



琼东南盆地陵水凹陷海底周期阶坎底形的特征及成因

程琳燕, 李磊, 高毅凡, 张威, 龚广传, 杨志鹏, 王潘

The characteristics and genesis of bottom cyclic steps in the Lingshui Sag of Qiongdongnan Basin

CHENG Linyan, LI Lei, GAO Yifan, ZHANG Wei, GONG Guangchuan, YANG Zhipeng, and WANG Pan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021041902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示](#)

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程琳燕, 李磊, 高毅凡, 等. 琼东南盆地陵水凹陷海底周期阶坎底形的特征及成因 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 37-44.

CHENG Linyan, LI Lei, GAO Yifan, et al. The characteristics and genesis of bottom cyclic steps in the Lingshui Sag of Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 37-44.

琼东南盆地陵水凹陷海底周期阶坎底形的特征及成因

程琳燕^{1,2}, 李磊^{1,2}, 高毅凡^{1,2}, 张威^{1,2}, 龚广传^{1,2}, 杨志鹏^{1,2}, 王潘^{1,2,3}

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065

3. 中国石油东方地球物理公司研究院地质研究中心, 涿州 072750

摘要:海底周期阶坎底形一直是海洋地质关注的热点。本文基于 285 km² 三维地震资料对琼东南盆地海底周期阶坎底形几何构型(波长、波高、迎流面长度、背流面长度、迎流面夹角和背流面夹角)及形成机理进行了分析。研究区位于上陆坡(2°~14°), 发育一条 NE-SW 水道, 宽 6.5 km, 深 35 m。水道内外均发育周期阶坎, 剖面上具有波状特征。周期阶坎的波长(20~160 m)随深度增加而变长, 波高(4~10 m)随深度增加而减小, 迎流面长度(20~140 m)比背流面长度(10~40 m)长, 迎流面夹角(0.1°~0.15°)平缓, 背流面夹角(0.2°~0.8°)陡峭。初步认为, 研究区周期阶坎底形由持续稳定的浊流形成, 且以沉积型周期阶坎为主。

关键词:周期阶坎; 水道; 超临界浊流; 琼东南盆地

中图分类号: P737.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021041902

The characteristics and genesis of bottom cyclic steps in the Lingshui Sag of Qiongdongnan Basin

CHENG Linyan^{1,2}, LI Lei^{1,2}, GAO Yifan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, GONG Guangchuan^{1,2}, YANG Zhipeng^{1,2}, WANG Pan^{1,2,3}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

3. Geological Research Center, Research Institute of PetroChina Eastern Geophysical Company, Zhuozhou 072750, China

Abstract: Cyclic steps, as a kind of bedforms on the deep sea bottom, are one of the hot research spots in deep sea geology nowadays. Based on the 285 km² of 3D seismic data collected from the Qiongdongnan Basin, the characteristics of cyclic steps, such as the wavelength, wave height, length of lee side, length of steep side, angle of lee side and angle of steep side, as well as their forming mechanisms are carefully analyzed in this paper. The study area is located on the upper slope (2°~14°), with a NE-SW channel of 6.5 km in width and 35 m in depth. Cyclic steps are developed on both inner and outer sides of the channel, with wavy patterns on profile. Wavelength (20~160 m) increases, while wave height (4~10 m) decreases with depth, the length of the leeward side (20~140 m) is longer than that of the windward (10~40 m), the leeward side is gentle (0.05°~0.06°), but windward side steep (0.1°~0.35°). It is suggested that most of the cyclic steps be formed by the deposition of a continuous and stable turbidity current.

Key words: cyclic steps; channel; supercritical turbidity current; Qiongdongnan Basin

周期阶坎是海底陆坡常见的地貌单元, 以连续的波状底形为特征, 是深水沉积体系的重要场所, 是现今海洋学研究的热点。周期阶坎一般发育环境分为海底和陆上两类, 其中在海底陆坡和坡折位置处向上游迁移的长波状底形最为常见。国外学者 Paker 和他的助手首先在明渠模拟实验中观察到一系列向上游迁移的台阶状底形, 并正式提出“周

期阶坎(cyclic steps)”一词^[1]。国内钟广法等^[2-3]最早发现并报道了南海东北部陆坡区海底峡谷谷底、越岸区和出口部位存在大量超临界流成因的大型沉积物波, 将其解释为“周期阶坎”。大多学者对海底周期阶坎进行了研究^[2-5], 但对于琼东南地区现今海底周期阶坎的研究颇少。在琼东南地区, 以往学者更加关注于海底峡谷的研究, 并发现在海底峡谷

资助项目: 国家自然科学基金项目“深水重力流流态转化研究”(41302147); “研究生创新与实践能力的培养计划”(YCS21112055)

作者简介: 程琳燕(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事地震解释及深水沉积方面的研究工作, E-mail: 1025667918@qq.com

通讯作者: 李磊(1979—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地震地质综合解释及海洋沉积方面的研究工作, E-mail: lilei@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-19; 改回日期: 2021-07-21. 文凤英编辑

或水道中常伴生一种类似台阶状的底形,且都有规律地朝一个方向运动,最初认为这种底形为海底沉积物波^[6]。然而关于琼东南陵水凹陷现今海底是否为周期阶坎还有待考究,研究区域内阶坎底形和其形成机制有助于理解海底流体活动,并为其他区域海底地貌单元识别提供参考。

本文基于琼东南盆地陵水凹陷浅层 285 km² 三维地震数据,对周期阶坎的构型和形成原因进行了分析。南海陆坡周期阶坎研究对加深海底地貌单元以及重力流沉积发育控制因素具有重要的意义。

1 地质概况

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘,地质构造复杂多变,属于陆架较窄和陆坡较陡的非典型被动大陆边缘性盆地^[7]。物源主要来自越南和海南岛的双物源供给,发育滑塌体、峡谷和海底扇等沉积体系^[7-8]。陆坡自西北向东南坡度整体逐渐变缓,陆坡海底发育大量的水道和大规模的重力流沉积^[9]。

琼东南盆地陆坡区自西向东按照陆坡的宽度、有无明显的坡折带和陆坡倾角大小,分为盆地西

部、盆地中部和盆地东部。陵水凹陷研究区位于琼东南盆地中部、水深 700~1500 m 的上陆坡区,坡度大约为 2°~16°(图 1a)。

2 数据和方法

本研究所使用的数据主要源于中国海洋石油有限公司从琼东南盆地获得并拥有的约 300 km² 的三维地震数据。研究区三维地震数据面元大小为 12.5 m×12.5 m(Inline×Crossline),采样率为 2 ms,频带宽度为 6~90 Hz,主频约 45 Hz,最大垂向分辨率($\lambda/4$)约 15 m。

利用 GeoFrame 软件对研究区现今海底浅层目的层同相轴进行解释,解释的网格精度为 10×10 (CDP),并将解释的层位进行时深转换,提取地震属性倾角、方位角和均方根(图 2a 为倾角属性平面图)等。利用解释的三维地震层位数据结合 Surfer 软件绘制了现今海底地形图(图 1b)。研究区海底地形图揭示现今海底发育阶梯状地貌,陆坡上存在多条小水道和一条清晰的大型水道(由两支小水道复合而成即水道复合体),水道壁附近台阶形态杂

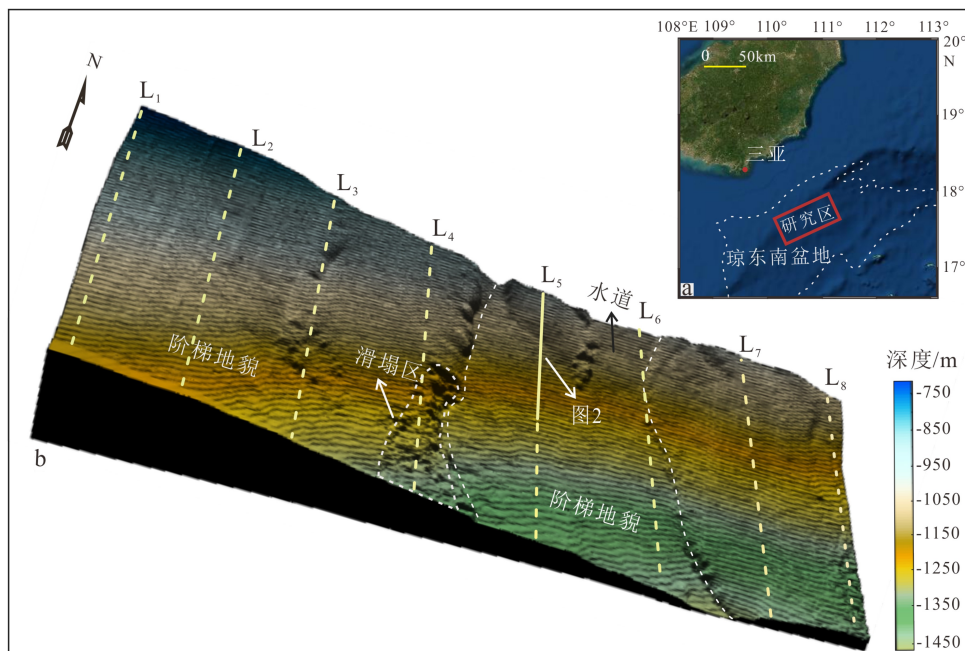


图 1 琼东南盆地位置图(a)及研究区海底地形图(b)

L₁ 测线号 6053, 研究区最西侧; L₂、L₃ 测线号分别为 6353、6653, 依次靠近水道左侧区域; L₄ 测线号 6953, 左侧水道壁附近; L₅ 测线号 7253, 水道内部; L₆ 测线号 7553, 右侧水道壁附近; L₇ 和 L₈ 测线号分别为 7854、8147, 研究区最东侧。

Fig.1 The location map(a)and the 3D topographic map of the study area(b)

L₁ inline 6053, on the westernmost side of the study area; L₂, L₃ inline 6353 and 6653, respectively, close to the left side of the channel; L₄ inline 6953, near the left side of the channel wall; L₅ inline 7253, channel Inside; L₆ inline 7553, on the right side of the channel wall; L₇ and L₈ inline are 7854 and 8147 respectively, the easternmost side of the study area.

乱(图 1b))。

3 周期阶坎底形的识别及特征描述

周期阶坎的识别依据主要基于三点: ① 周期阶坎经常发育在高坡度和坡折带区域^[10-16]; ② 当坡度超过 0.6° 时, 浊流可能达到超临界流状态^[16-18]; ③ 周期阶坎发育的波长较长, 多为链状, 不对称, 向上游迁移, 形态似台阶状^[16-17, 19]。研究区发育的底形所处位置、坡度以及形态特征与形成“周期阶坎”的条件吻合。

NW-SE 向剖面上周期阶坎(图 2b)表现为波状亚平行结构地震相, 多组同相轴互相平行并呈波浪状起伏, 波形起伏较小, 不对称, 波脊逆坡迁移。波状底形是由波脊和波谷相间构成, 似阶梯状, 高度为 $6\sim 10\text{ m}$ 。周期阶坎类型为长波形、不对称、似正弦曲线多数向上游迁移, 部分向下游迁移的新月形。

由于海水与地层之间的密度差, 上下地层的振幅反射特征发生了明显变化, 波阻抗系数增大, 因此地震同相轴连续性较好, 利于研究周期阶坎的具体形态特征。选取 8 条测线(图 1b 中 L_1-L_8) 计算和分析每一测线上周期阶坎的几何构型(图 2c)。使用几何构型参数(波长(L)、倾角(θ)、波高(H)、迎流面长度(L_{step})、背流面长度(L_{lee})、迎流面夹角(α)、背流面夹角(β)以及迎流面与背流面长度的比值(R)), 刻画海底阶梯形态。

数据统计结果表明: 单个周期阶坎波高 $4\sim 10\text{ m}$, 波长 $20\sim 150\text{ m}$, 倾角 $2^\circ\sim 14^\circ$, 波长/波高为 $4\sim 30$ 。

研究区自西向东(自 L_1 到 L_8) 阶坎波长随着坡度变缓依次增加(图 3), 即区域内周期阶坎之间的间距不等。研究区水道内部的阶坎波长(L_5) 较水道外部波长变化曲线趋势更加明显。水道壁附近(L_4 、 L_6) 波长随深度变化数据有跳跃变化。单个周期阶坎的迎流面与背流面随深度变化: ① 长度: 迎流面长 $20\sim 140\text{ m}$, 背流面长 $10\sim 40\text{ m}$ 。迎流面长度波动范围更广, 背流面长度变化则更加集中(图 4); ② 角度: 迎流面角度 $0.1^\circ\sim 0.15^\circ$, 背流面角度 $0.2^\circ\sim 0.8^\circ$ 。整个曲线趋势总体是背流面角度远大于迎流面, 极少数迎流面角度大于背流面角度。随深度变化整个 8 条测线上的周期阶坎: ① 迎流面和背流面长度均逐渐增加, 但迎流面长度增长趋势远大于背流面; ② 迎流面角度变化集中, 背流面角度波动范围更广。

4 讨论

琼东南盆地陵水凹陷现今海底开放陆坡上分布成片大面积的周期阶坎底形是如何形成的? 有哪些有利条件导致了这些底形的形成? 针对这些问题, 在前人的研究基础之上综合研究区所处地质环境对形成区域周期阶坎底形的形成过程和成因机制进行了详细的探究。陵水凹陷现今海底发育的周期阶坎底形分布范围广、数量多、类型多而集中。

4.1 周期阶坎形成过程

周期阶坎的形成与流体动力学有关。区域内

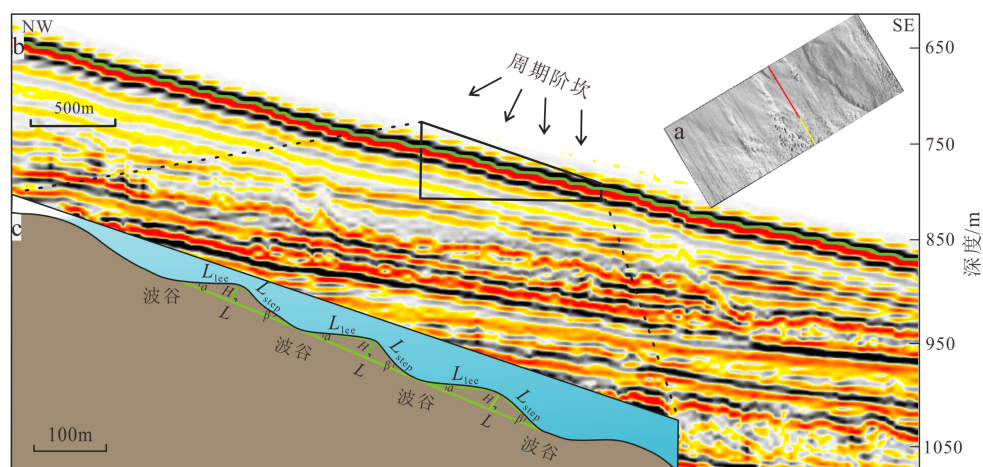


图 2 琼东南盆地现今海底阶梯地形分析图

a. 倾角属性平面图(红色线是地震剖面所在位置图), b. 典型地震剖面图, c. 阶梯几何构型图。

Fig.2 Present submarine cyclic step topography of the Qiongdongnan Basin

a. dip_ attribute map, b. typical seismic profile, c. stepped geometric configuration diagram.

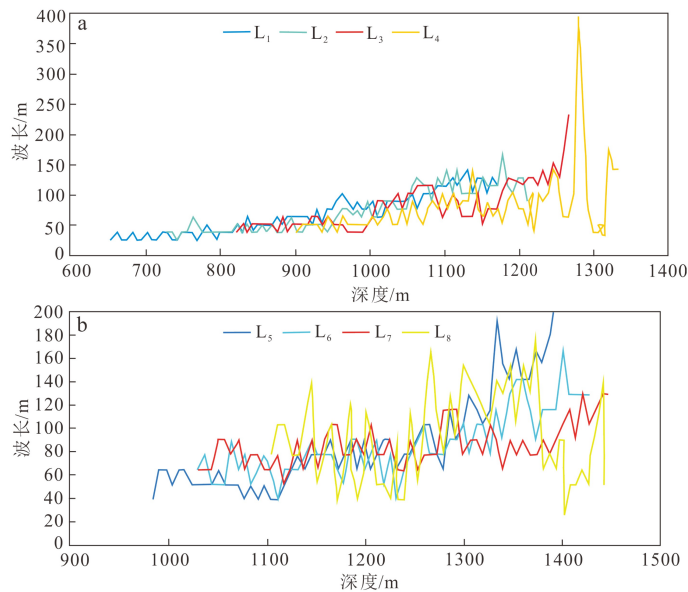


图3 波长随深度变化曲线图 (测线位置见图1b)

Fig.3 The relation between wavelength and depth

发育的周期阶坎底形是由于浊流携带的陆源碎屑物质通过海底峡谷或水道重力流体通道从陆架途径陆坡向下游搬运,在搬运途中随流体动力学参数弗劳德数($Fr = U / \sqrt{RCgD}$,其中, R :浊流中沉积物折算密度, C :浊流中平均体积浓度, D :浊流的厚度)变化而形成的一种阶梯状底形^[20]。研究区成片大面积分布的周期阶坎底形足够说明水流携带的泥沙等碎屑物质能量强。靠近上陆坡区,浊流能量强,单位时间内形成的周期阶坎底形数目多,在立体图上显示出它们之间排列更加紧凑(图1b)。靠近下陆坡区,坡度减小,水动力减弱,沉积物沉积厚度变薄,单位时间形成的周期阶坎数目减小,故形成的周期阶坎底形在下陆坡间距增大(图1b)。单独一条测线上形成的周期阶坎形态类同,但大小不同。一个完整的周期阶坎形成,需要两种水流流态:①水流携带的泥沙等碎屑物质从阶梯底部向顶部运动过程中,由于水流流速不断地减小,流体从上一个阶段的超高速超临界流结束不断地向亚临界流转化,一部分水流动能被紊流消散,剩余的动能转化为位能,会导致液面升高,即水流产生的惯性小于流体自身的重力,形成亚临界流,此时 $Fr < 1$ ^[4,21]。②当 $Fr > 1$ 时,水流向下游流动的惯性大于向上游传播的波速,产生超临界流,此时不可能有向上游移动的波^[22],从而形成长波长的迎流面。理想状态下,流体从第一个阶坎底部向顶部水力跳跃完成第一个周期阶坎,接下来将剩余的能量用来完成第二个周期阶坎,依次类推,直到水跃能量消失,底形将不存在。周期阶坎的形成是浊流从

超临界流到亚临界流过程中水力跃变形成的底形。

周期阶坎由一系列连续的陡峭背流面和平缓迎流面组成,并且经常在背流面与迎流面转换区域形成冲沟或深坑^[20]。依据侵蚀作用的强弱,分为三种类型:①沉积型周期阶坎。水流中携带的沉积物很难被带走从而在迎流面卸载,当超临界流流经每个阶梯底部时,向亚临界流转化并产生水跃。水流继续沿着迎流面上倾方向流动,流速逐渐减缓,水流能态进一步降低,水流侵蚀作用被削弱因而以沉积作用为主^[18,23]。②过渡型周期阶坎。水流能态不足以达到超临界流形成水跃,沉积作用与侵蚀作用相当。③侵蚀型周期阶坎。当水流经过阶梯顶点后位能最大,位能沿背流面下倾方向不断加速转化为动能,即水流流速逐渐增大使得浊流携带的碎屑物质很难被保留下来,其水流流态从亚临界流向超临界流转化,因此以侵蚀作用为主,从而形成的阶坎底形背流面陡峭^[24]。长波状周期阶坎的形成,迎流面以沉积作用为主,背流面以侵蚀作用为主。

研究区周期阶坎迎流面长度主要大于背流面长度,在规模上属于中型沉积型周期阶坎。随深度的增加,沉积物在平缓的一侧不断加积,使得周期阶坎迎流面一侧长度不断变长。周期阶坎平缓的迎流面和陡峭的背流面,使得沉积物发生了沉积/侵蚀差异作用,最终沉积波向浊流上游方向迁移逐渐形成月牙状^[4,23,25-26]。另外,迎流面长度与背流面长度比值大于数值1,即周期阶坎底形呈不对称性。周期阶坎迎流面主要是以亚临界流沿上倾方向加速沉积形成的平缓状斜坡,而背流面是超临界流沿



图 4 迎流面、背流面长度随深度变化曲线图

测线位置与图 1b 中 L₁—L₈ 测线位置一致。

Fig.4 The relation of the length of stoss and lee sides with depth

The position of survey line is consistent with the position of survey line L1-L8 in Fig. 1b.

下倾方向水跃侵蚀作用形成的陡峭坡^[18, 23], 说明迎流面沉积粒度比背流面粗。周期阶坎呈现的有规律的向下游排列的线性构造底形指示沉积物向下游搬运, 其沉积波上游方向粒度最粗, 向下游方向粒度逐渐变细。

4.2 周期阶坎的成因机制

近年来, 众多学者研究认为周期阶坎在海底广泛存在^[4, 16, 18]。Cattane 等^[20] 研究认为周期阶坎的形成可能是浊流与原先存在的不规则地形之间相互作用, 但 Kubo 等质疑 Cattane 等只是简单地夸大了地形对形成周期阶坎的影响, 并没有考虑到浊流水力跃变输送的能量。之后, Spinewine 等^[27] 实验结果和 Kostic 等^[24] 数值模拟结果均一致表明持续的

浊流易于形成周期阶坎, 与预先存在的地形没有直接的联系。王海荣等^[28] 认为浊流形成的沉积波具有迁移特征, 周期阶坎的形成是多种成因共同的结果。在前人的研究基础之上, 笔者从浊流和坡度两方面对研究区的周期阶坎进行了分析。

4.2.1 浊流

浊流是重力流的一种表现形式, 浊流的流体动力学影响了深水沉积体系结构单元的演化, 可以分为超临界流和亚临界流两种。浊流内部携带的碎屑物质属于高密度流体, 流速一般很大^[29]。研究区沉积波的地震剖面显示下切水道十分发育, 周期阶坎的形成是浊流作用的结果。

周期阶坎与浊流有关的因素有: ① 与浊流中高密度流体密切联系。陵水凹陷现今海底陆坡区靠

近物源,地形高差大,偶然的事件沉积(异重流)引起泥砂混杂持续性、密度高的沉积物容易形成周期阶坎底形,且 Cartigny 数值模拟实验^[12]证实,沉积物浓度是发生水力跃变的有力因素。水跃往往发生在沉积物浓度确定的范围内,浓度越大,形成周期阶坎的个数越多,规模越大^[14]。②与浊流粒度和沉积速率有关。丰沛的碎屑物质从“源”系统途经研究区汇入到深海盆地,沉积物沉积速率逐渐降低,沉积物粒度由粗变细。整个周期阶坎的迎流面长度自 L_1 到 L_8 不断地变长,其中沉积物的沉积厚度迎流面比背流面厚,形成的周期阶坎底形往往不稳定。研究区西部沉积物粒度比东部粗,西部沉积物的沉积速率比东部高。高的沉积速率易于波状底形的完整保存,而且容易形成不对称底形^[14]。③与浊流的流量和流速有关。随流速的增加底形会依次出现:无颗粒运动的平坦床沙、沙纹、沙浪、沙丘、过渡丘(或低角度沙丘)、平坦床沙、周期阶坎、流槽和凹坑^[22, 30-31]。随浊流流量的增加,超临界流的侵蚀能力逐渐增强,形成水力跃变的可能性越高,更容易形成周期阶坎底形。在前人理论研究基础之上,笔者认为研究区浊流的流速高而稳定,因此形成了大范围的周期阶坎底形。

周期阶坎的形成、演化过程与发育在陆架边缘斜坡和峡谷水道中的浊流体系密不可分^[32]。到目前为止,部分学者已经证实了浊流形成的沉积波能够以周期阶坎底形出现^[2, 19, 21, 33]。周期阶坎底形甚至在高山流水、冰川中都可以出现。

4.2.2 坡度

地形坡度是控制超临界流体发生水跃形成周期阶坎底形的关键因素。地形坡度较大时,浊流携带的沉积物位能高,其沿斜坡分力较大,侵蚀作用明显,因此形成侵蚀型和粗粒度的沉积型周期阶坎;随研究区域坡度的变缓,浊流所携带的沉积物能量逐渐递减,流体的搬运能力相应地也逐渐减弱,水力跳跃后在阶梯顶部需要的能量更大,其缓冲距离加大,大量的沉积物开始堆积,粒度较细的沉积物开始沿着上倾斜坡不断地堆积形成长高比不断增大的沉积型周期阶坎^[23, 34-35]。鲁勇的水槽实验表明,在坡道转换处会发生水跃,其水跃强度随坡度的增加而增加。在坡度、水流量和体积比浓度相等的情况下,坡上的平均沉积厚度小于坡下平均沉积厚度,即迎流面沉积速率与背流面的沉积速率不同^[34]。一般情况下,陡峭的坡度和高密度的弗劳德数有利于周期阶坎的形成^[36]。然而,坡度超过 0.92° 形成周期阶坎底形可能性会降低。坡度越陡,

流体重力沿斜坡的分量增大促使流体不断加速,从而抑制流体内产生水跃的能量且增大了转化为亚临界流的可能性^[18]。

坡度是超临界流水形成周期阶坎底形的前提要素^[3, 18]。在一定的条件下,由陡峭的斜坡过渡到相对平缓的斜坡可能会导致浊流发生水力跃变^[37]。

5 结论

(1) 陵水凹陷现今陆坡海底具备的坡度较陡、近物源等为周期阶坎底形的发育提供了有利条件,周期阶坎底形是构成深水沉积体系的重要沉积单元。

(2) 陵水凹陷现今海底发育一条宽约 6.5 km 具有明显侵蚀特征的大型水道,是构成“源-汇”系统的重要通道。水道内外发育的周期阶坎底形在地震剖面上表现为连续波状亚平行强振幅地震相。周期阶坎的发育指示现今海底浊流流速急剧,流量大。

(3) 通过对周期阶坎底形形成机制进行分析,认为浊流和坡度是形成周期阶坎的最主要的因素。周期阶坎在坡度适中、浊流发育的地带容易形成。

参考文献 (References)

- [1] Parker G. Interaction between basic research and applied engineering: A personal perspective [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1996, 34(3): 291-316.
- [2] 钟广法, 朱本铎, 王嘹亮. 南海浊流地貌[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 75-82. [ZHONG Guangfa, ZHU Benduo, WANG Liaoliang. Turbidity current related landforms in the South China Sea [J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(18): 75-82.]
- [3] Zhong G F, Cartigny M J B, Kuang Z G, et al. Cyclic steps along the South Taiwan Shoal and West Penghu submarine canyons on the northeastern continental slope of the South China Sea [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127(5-6): 804-824.
- [4] 许小勇, 吕福亮, 王大伟, 等. 周期性阶坎的特征及其对深水沉积研究的意义[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(4): 1-14. [XU Xiaoyong, LÜ Fuliang, WANG Dawei, et al. Cyclic steps and significance to deep water sedimentation [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(4): 1-14.]
- [5] 高红芳, 钟和贤, 孙美静, 等. 南海海盆东南部大型深水浊积扇体系及其成因的构造控制[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1395-1406. [GAO Hongfang, ZHONG Hexian, SUN Meijing, et al. The large deep-water turbidity fan system in southeastern South China Sea Basin: Formation and tectonic constraint [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1395-1406.]
- [6] Wynn R B, Piper D J W, Gee M J R. Generation and migration of coarse-grained sediment waves in turbidity current channels and channel-lobe transition zones [J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1-3):

- 59-78.
- [7] 曾小明, 潘燕, 于佳, 等. 陵水凹陷北坡低密度浊流海底扇沉积特征 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15 (33): 48-53, 78. [ZENG Xiaoming, PAN Yan, YU Jia, et al. Low-density turbidity submarine fan sedimentary characteristics in north slope of Lingshui sag [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15 (33): 48-53, 78.]
- [8] 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水油气成藏条件早期预测与评价 [J]. *天然气地球科学*, 2008, 19 (6): 780-789. [HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, MA Wenhong, et al. Early forecast and evaluation on petroleum accumulation conditions in deep basin in northern continental margin of the South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19 (6): 780-789.]
- [9] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54 (12): 3184-3195. [WU Shiguo, QIN Zhiliang, WANG Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54 (12): 3184-3195.]
- [10] Fildani A, Hubbard S M, Covault J A, et al. Erosion at inception of deep-sea channels [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 48-61.
- [11] Heiniö P, Davies R J. Trails of depressions and sediment waves along submarine channels on the continental margin of Espirito Santo Basin, Brazil [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121 (5-6): 698-711.
- [12] 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 (1-4): 40-56.
- [13] Fielding C R. Upper flow regime sheets, lenses and scour fills: extending the range of architectural elements for fluvial sediment bodies [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190 (1-4): 227-240.
- [14] Kostic S. Modeling of submarine cyclic steps: Controls on their formation, migration, and architecture [J]. *Geosphere*, 2011, 7 (2): 294-304.
- [15] Gong C L, Chen L Q, West L. Asymmetrical, inversely graded, upstream-migrating cyclic steps in marine settings: Late Miocene-early Pliocene Fish Creek-Vallecito Basin, southern California [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 35-46.
- [16] Li L, Gong C L. Gradual transition from net erosional to net depositional cyclic steps along the submarine distributary channel Thalweg in the Rio Muni Basin: A joint 3-D seismic and numerical approach [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123 (9): 2087-2106.
- [17] Lamb M P, Parsons J D, Mullenbach B L, et al. Evidence for superelevation, channel incision, and formation of cyclic steps by turbidity currents in Eel Canyon, California [J]. *GSA Bulletin*, 2008, 120 (3-4): 463-475.
- [18] 谈明轩, 朱筱敏, 刘伟, 等. 旋回阶梯底形的动力地貌及其相关沉积物发育特征 [J]. *地质论评*, 2017, 63 (6): 1512-1522. [TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, LIU Wei, et al. The morphodynamics of cyclic steps and sedimentary characteristics of associated deposits [J]. *Geological Review*, 2017, 63 (6): 1512-1522.]
- [19] 王大伟, 孙悦, 司少文, 等. 海底周期阶坎研究进展与挑战 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35 (9): 890-901. [WANG Dawei, SUN Yue, SI Shaowen, et al. Research progress and challenges of submarine cyclic steps [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35 (9): 890-901.]
- [20] 肖彬. 深水水道沉积体系及成因机制研究 [D]. 长江大学博士学位论文, 2014. [XIAO Bin. Sedimentary system and formation mechanism of deep-water channel complex [D]. Doctor Dissertation of Yangtze University, 2014.]
- [21] 王大伟, 白宏新, 吴时国. 浊流及其相关的深水底形研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33 (1): 52-65. [WANG Dawei, BAI Hongxin, WU Shiguo. The research progress of turbidity currents and related deep-water bedforms [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (1): 52-65.]
- [22] 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008. [ZHU Xiaomin. Sedimentary Petrology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.]
- [23] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 超临界沉积物重力流形成演化及特征 [J]. *石油学报*, 2017, 38 (6): 607-621. [CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 38 (6): 607-621.]
- [24] Kostic S, Parker G. The response of turbidity currents to a canyon-fan transition: internal hydraulic jumps and depositional signatures [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44 (5): 631-653.
- [25] 张兴阳, 何幼斌, 罗顺社, 等. 内波单独作用形成的深水沉积物波 [J]. *古地学期刊*, 2002, 4 (1): 83-89. [ZHANG Xingyang, HE Youbin, LUO Shunshu, et al. Deep-water sediment waves formed by internal waves [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4 (1): 83-89.]
- [26] 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. [ZHONG Guangfa, LI Qianyu, HAO Hujun, et al. Current status of deep-water sediment wave studies and the South China Sea perspectives [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22 (9): 907-913.]
- [27] Spinewine B, Sequeiros O E, Garcia M H, et al. Experiments on wedge-shaped deep sea sedimentary deposits in minibasins and/or on channel levees emplaced by turbidity currents. Part II. Morphodynamic evolution of the wedge and of the associated bedforms [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79 (8): 608-628.
- [28] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17 (9): 1235-1243. [WANG Hairong, WANG Yingmin, QIU Yan, et al. Sediment waves in the deep water environment of the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17 (9): 1235-1243.]
- [29] Middleton G V, Hampton M A. Part I. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition [J]. *Turbidites & Deep Water Sedimentation*, 1973.
- [30] 胡日军. 南海北部外陆架区海底沙波动态分析 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006. [HU Rijun. Dynamical analysis of seafloor sandwaves in the outer continental shelf of the northern South China Sea [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2006.]
- [31] 张洪运. 南海北部陆架坡折附近的海底沙波的形态特征、活动规律

- 和成因机制[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2019. [ZHANG Hongyun. Sand waves near the shelf break of northern South China Sea: morphology, mobility and mechanism[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2019.]
- [32] 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.
- [33] 李爽, 李伟, 詹文欢. 南海东北部陆缘浊流活动的地貌记录及其形成机制分析[J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(1): 111-121. [LI Shuang, LI Wei, ZHAN Wenhuan. Geomorphological records of turbidity current activity in the northeastern margin of the South China Sea and analysis of triggering mechanism [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(1): 111-121.]
- [34] 鲁勇. 多坡道的浊流流动及沉积的实验研究[D]. 安徽工业大学硕士学位论文, 2019. [LU Yong. Experimental study on the flow and deposition of turbidity currents with multiple slope transitions[D]. Master Dissertation of Anhui University of Technology, 2019.]
- [35] 丁巍伟, 李家彪, 韩喜球, 等. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析[J]. *海洋学报*, 2010, 32(2): 96-105. [DING Weiwei, LI Jiabiao, HAN Xiqiu, et al. Geomorphology, grain-size characteristics, matter source and forming mechanism of sediment waves on the ocean bottom of the northeast South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(2): 96-105.]
- [36] Fildani A, Normark W R, Kostic S, et al. Channel formation by flow stripping: Large-scale scour features along the Monterey East Channel and their relation to sediment waves [J]. *Sedimentology*, 2006, 53(6): 1265-1287.
- [37] Jalili Ghazizadeh M, Fallahi H, Jabbari E. Characteristics of water surface profile over rectangular side weir for supercritical flows [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2021, 147(5): 04021011.