

赵冬冬,成海燕,林凡生,等.黄河三角洲海底滑坡诱发条件——以埭岛海区为例[J].海洋地质前沿,2020,36(7):25-30.

黄河三角洲海底滑坡诱发条件

——以埭岛海区为例

赵冬冬¹,成海燕^{1,2,3},林凡生^{1,2,3},秦显科^{1,2,3},朱先凯¹,陈晓诚¹,张超¹

(1 中国冶金地质总局青岛地质勘查院,青岛 266109;2 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100;

3 海底科学与探测技术教育部重点实验室,青岛 266100)

摘要:2003年11月,黄河水下三角洲2条海底电缆断裂,推测与该区域冲蚀沟较为发育有关。通过多波束测深、浅地层剖面探测、侧扫声呐调查等物探调查方法对埭岛海区开展地质调查,以揭示黄河三角洲地区海底滑坡诱发条件。研究发现:埭岛海区海底存在多条冲蚀沟,软弱土层较为发育,冲蚀沟地层扰动较为明显;通过波浪海流对海底土体的影响分析,判断不同水深和不同土体在浪潮流作用下海底冲蚀沟的发育程度,得出海底滑坡的诱发条件,结合人类活动和海底自然坡度等因素的影响,分析研究区仍然具有发生海底滑坡的可能性。

关键词:黄河三角洲;海底滑坡;冲蚀沟;地层扰动

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2020.018

0 引言

海底滑坡是一种破坏力较大的海洋地质灾害,海底滑坡不仅会威胁钻井平台、海底管道、路由等基础设施,还有可能引发巨浪、海啸等灾害,因此,研究海底滑坡对于海洋经济的发展以及海洋地质灾害的预测等均具有重要意义。

黄河三角洲研究起步较早,在1985—1986年间的中美黄河口合作调查中,就观测到了一些海底不稳定现象,发现该海域海底滑坡广泛存在^[1-2]。冯秀丽等^[3]对埭岛北部海域开展工程地质评价,发现该海域海底地层以粉土为主,海底以下10 m以内地层可分为粉土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土4层,表层扰动较为发育,平均扰动深度约6 m。近年来,该海域的海底滑坡事件主要有:①2003年11月,黄河水下三角洲2条海底电缆断裂;②2010年,胜利油田作业三号平台因海底地层失稳发生倾覆,致2人溺亡,直接经济损失592万元。近几年的侧扫声呐探测和原位测试资料显示,

黄河三角洲地区海底滑坡进一步发育,表现为重新开始移动和重复移动^[4]。李安龙等^[5]基于Iversion的海底稳定渗流理论,研究了黄河水下三角洲不同土质所需的孔压梯度,并对黄河水下三角洲的海底稳定性进行了预测。蒲高军等^[6]利用GEO-SLOP OFFICE海底滑坡分析软件,研究了重力、波浪、孔压等因素对埭北海域海底滑坡的影响,分析海底滑坡的可能性,发现孔隙水压力可能导致海底失稳引发海底滑坡。李海东等^[7]利用浅剖、声呐以及测深资料研究现代黄河水下三角洲地质灾害的空间分布特征,发现废弃三角洲北侧广泛分布有海底滑坡、冲蚀构造等地质灾害,并且多分布在水深5~10 m的三角洲陡坡上。彭俊等^[8]利用测深仪等海洋测绘设备研究了黄河三角洲侵蚀性岸段水下岸坡的地质灾害分布特征,揭示了该区域发育有海底滑坡、冲蚀构造等地质灾害。肖鹏等^[9]利用GIS技术研究了黄河三角洲海底浅层滑坡的区域分布特征,发现该地区滑坡分布相对均匀,具有一定的分带性。赵景蒲等^[10]利用遥感、浅剖、单波束测深资料等研究东营市近海的灾害地质特征,认为黄河三角洲的灾害地貌多分布于三角洲前缘及老河口三角洲北部叶瓣处,浅地层剖面显示该区域存在浅层旋转滑坡体。然而,海底滑坡发生在水下不易察觉,其形成机制及发育过程与陆地滑坡有一定的差异,因此,

收稿日期:2020-03-06

资助项目:山东省科学技术厅2016年度重点研发计划(2016ZDJS09A03)

作者简介:赵冬冬(1976—),男,高级工程师,主要从事海洋地质、环境地质、地质勘查等研究工作。E-mail: ytzhd@126.com

对海底滑坡的研究和认知均存在一定的局限性。本文通过对黄河三角洲地区海底滑坡区域开展物探调查工作,在总结前人研究成果的基础上,研究黄河三角洲地区海底滑坡诱发机理与滑坡过程,以揭示该地区海底滑坡的潜在诱发条件。

1 海上调查

研究区海底较为复杂,滑坡、碎屑流、塌陷凹坑较为发育,常规的单波束测深辅助侧扫声呐的调查方法难以精确探测地形地貌的细微变化。本次调查使用多波束测深系统结合侧扫声呐系统开展水

深地形探测工作,为了减少侧扫声呐、浅剖设备的干扰,前期只开展多波束水深测量,获取更精准的水深数据,之后同步开展侧扫声呐调查和浅地层剖面探测,并利用双频测深仪对浅水区域进行水深地形测量。浅水区调查区域水深地形测量采用 Teledyneom 公司生产的双频测深仪(Echotrack MK III),测深仪工作频率分为高频(100~1 000 kHz)和低频(35~50 Hz),浅水区水深测量时测深仪的工作频率主要采用高频测量,工作频率为 100 kHz。本次调查使用的调查船是长 35 m、宽 6 m 的钢质渔船,调查时间是 2018 年 5 月,所用调查设备详细参数如表 1 所示。

表 1 调查用设备参数

Table 1 Parameters of research equipment

序号	设备名称	型号	性能
1	多波束测深仪	Kongsberg EM2040C	工作频率: 250 kHz; 工作水深: 0~500 m; 工作精度: 1 cm
2	浅地层剖面仪	Innomar SES2000	能量输出: 50 J; 穿透能力: 约30 m; 分辨率: 10 cm
3	侧扫声呐	Klein3000	工作频率: 100 kHz、500 kHz; 工作水深: 0~1 500 m; 扫宽: 10~150 m
4	双频测深仪	EchotrackMKIII	工作频率: 100~1 000 kHz, 35~50 Hz; 工作水深: 0.22 m; 分辨率: 0.01 m

研究区大致位于 2003 年风暴作用导致 2 条海底浅埋电缆发生断裂的区域,是在综合以往研究资料的基础上,在管缆断裂区选定的典型矩形研究区域(图 1)。测区范围为以平台 CB12B 为中心的 3 km×3 km 范围内,采用了单波速(高频)、多波束水深测量、浅地层剖面测量、侧扫声呐测量等多种海洋地球物理测量手段。测线布设情况如图 2 所示,共布设主测线 19 条,测线间距 20 m;检查测线 3 条,测线间距 30 m。每条测线长 3 km,区域全覆盖。同时还收集了研究区 2017 年 11 月份 7 个站点的海流观测数据,其观测站位分布如图 2 所示。

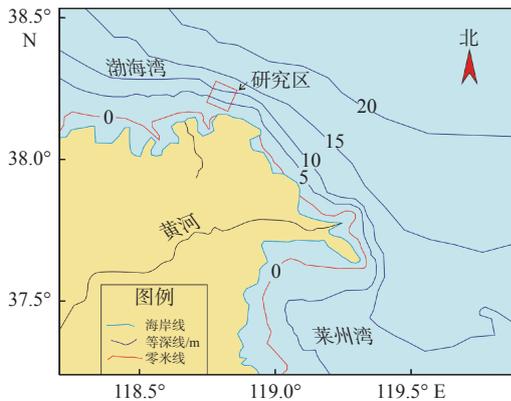


图 1 研究区位置示意图(图中红色方框表示研究区域)
Fig.1 Location of research area (the red box in the figure indicates the research area)

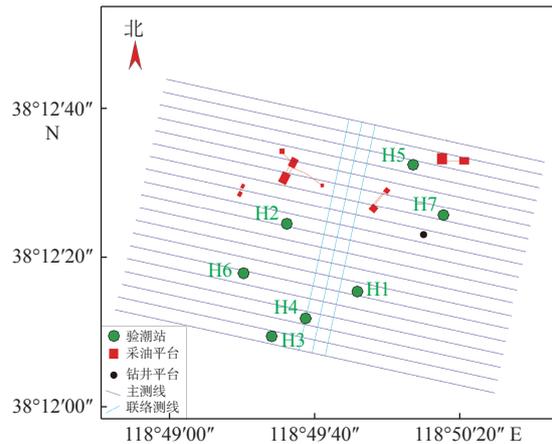


图 2 测线及站位分布图
Fig.2 Distribution of survey line and station

2 结果与分析

多波束水深地形资料显示研究区水深为 7~11 m。计算结果表明,波浪对海底的剪应力随水深增加呈现先增加后减小的趋势。在水深 8.5 m 左右剪应力达到最大值,为 13.1 Pa;当水深 > 15 m 时,剪应力 < 3.5 Pa,对海底作用不明显^[11]。波浪产生的底部剪应力一般情况下远小于土体的抗剪强度,而远大于土体的临界侵蚀剪应力,说明在不同大浪作用过程

中, 土体会产生一定量的冲刷。由于海底沉积物分布不均匀, 不同水深处波浪产生的底部剪应力不同, 海底沉积物的抗冲刷能力各不相同。从水深地形图(图 3)可以看出, 测区海底粗糙不平, 多呈斑状。测区西部存在多条冲蚀沟, 最深的冲蚀沟水深接近 11 m。由该区域 7 个站位的表、中、底 3 层海流矢量图(图 4)

可以看出, 各正点时刻涨、落潮流的流向较为集中, 揭示了海流往复运动的特性; 实测海流的流速随水深的增加而减小, 除转流时刻外, 表、中、底 3 层流向基本一致。结合冲蚀沟分布的位置和走向分析发现, 冲蚀沟的走向与海流方向大致一致, 初步推断该区域的土体扰动与海流作用具有一定的相关性。

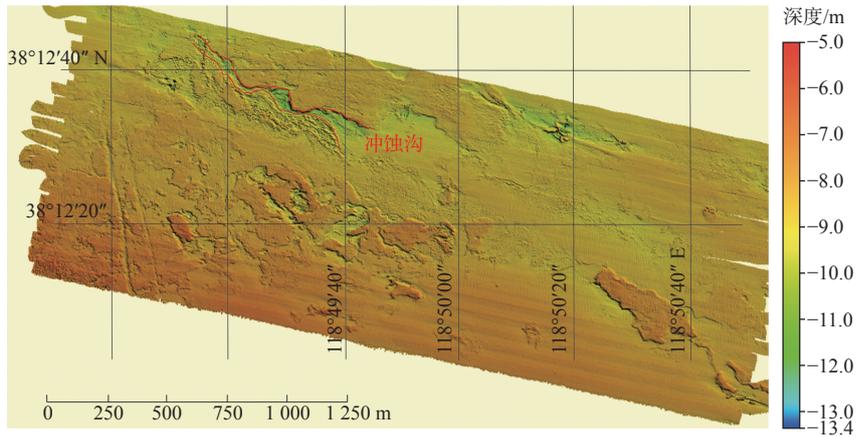


图 3 多波束水深地形图 (图中红线描绘的是冲蚀沟)

Fig.3 Multi-wave velocity water depth topographic map (the red line indicates erosion ditch)

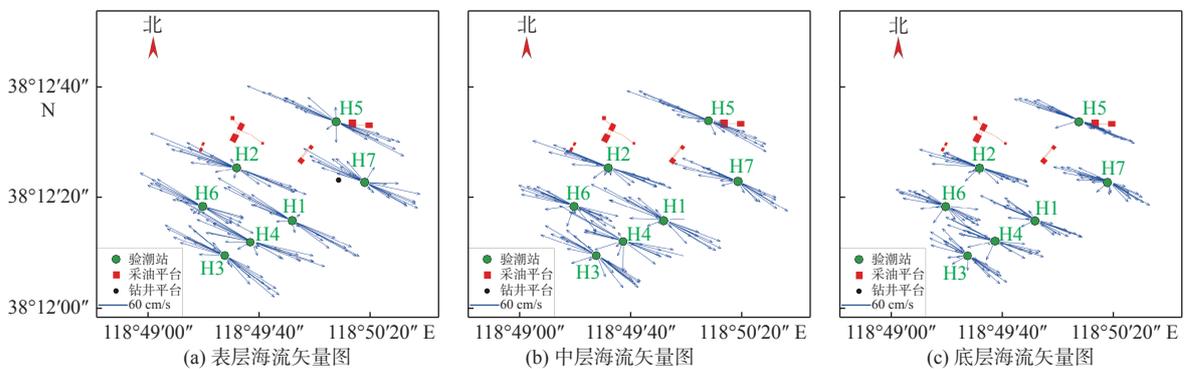


图 4 研究区实测海流矢量图

Fig.4 The measured ocean current vector diagram in the study area

浅地层剖面资料显示冲蚀沟区域存在大量土体扰动, 声呐探测资料中也存在相关影像(图 5)。浅地层剖面显示: 冲蚀沟地区扰动地层 A-B 段长度约 240 m, 扰动深度约 4 m(图 5a-c); 扰动地层 B-C 段长度约 126 m, 扰动深度约 3 m(图 5d-f)。扰动地层在地形上可表现为正地形和负地形, 推测与冲蚀沟不同区域的水动力作用强弱有关。

结合声呐影像及以往研究资料^[12-13], 本次研究根据浅地层剖面探测资料的强反射界面对海底地

层进行划分, 研究结果如下: 在海底面(R0)以下至 20 m 以浅的地层中, 存在 2 个连续强波阻抗界面(R2 和 R3)和 1 个断续强反射界面(R1)(图 6), 由上而下界定了 A、B、C、D 4 套地层单元。A 层主要是三角洲蚀退中形成的粉砂层; B 层主要是粉质黏土; C 层为粉质黏土、淤泥质粉质黏土地层; D 层为粉质黏土层。研究区上部结构较为复杂, 扰动地层较为发育, 下部地层较为稳定, 推测与海浪冲蚀作用有关。

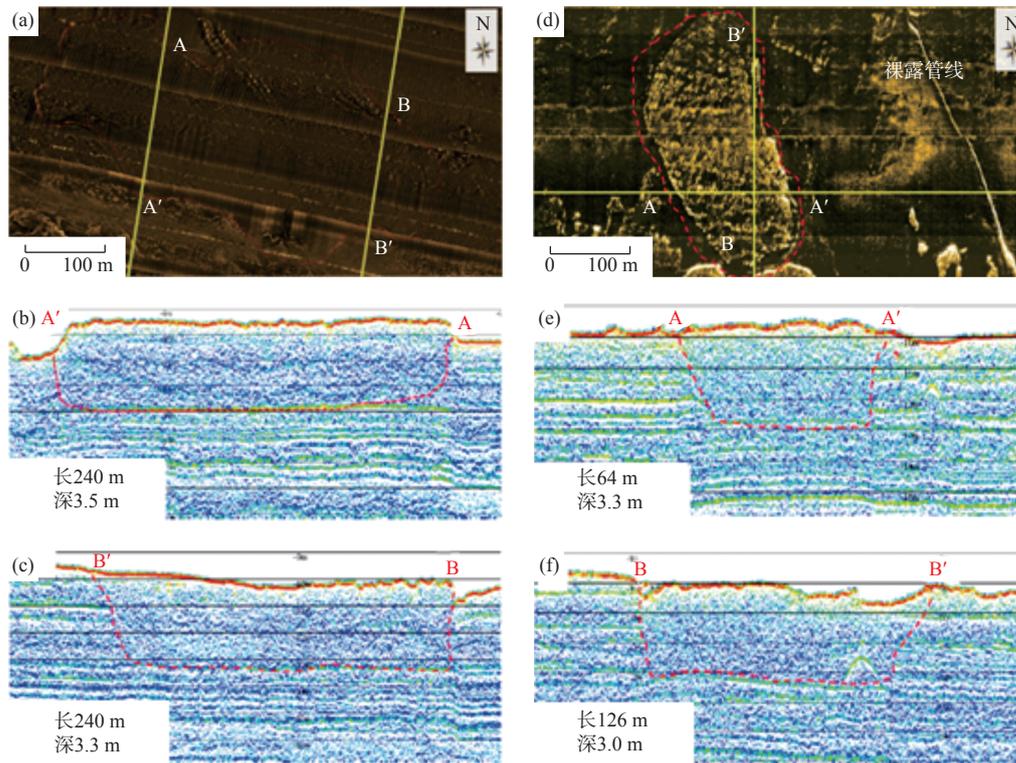


图5 冲蚀沟区域海底面状况及浅地层剖面图

Fig.5 Shallow profiles showing sea floor condition in erosion ditch area

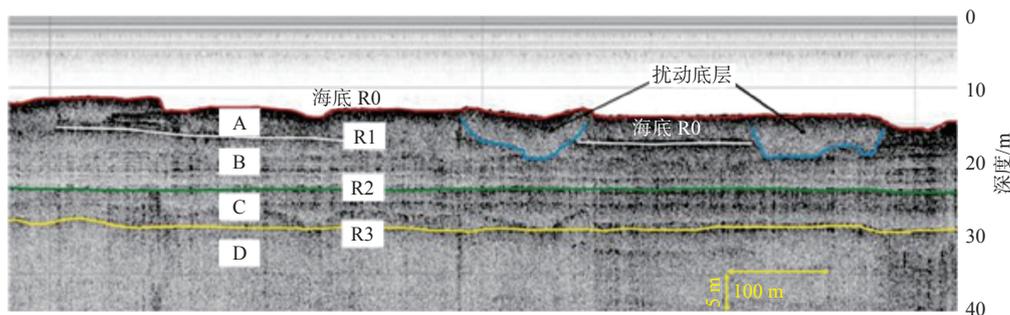


图6 埕岛海区扰动地层浅地层剖面图

Fig.6 Shallow profile showing disturbed strata in Chengdao area

3 讨论

海底滑坡受海底地层的力学性质、地形条件、底质松散度等诸多因素影响^[14]。海底底质的物理力学性质对滑坡的影响较为明显,已有研究表明,在低抗剪强度的海底沉积物区域,坡度较小的平缓海底也可发生海底滑坡^[15]。海底滑坡一旦触发,滑坡体可在海底保持运动,滑坡体最长运动距离可达1 500 km^[16]。研究区浅剖和多波束探测资料显示,该海域海底表层浮泥广泛分布,扰动地层较为发育,

是海底滑坡的潜在诱发条件。海底地层中广泛发育的软弱地层极易发生扰动,进而发育成海底滑坡的滑移面。根据前人研究结合多波束测深资料发现,该研究区海底整体冲刷趋势以6~8 m水深线为中心、向岸逐渐减小,在近岸区5 m以内的范围冲刷深度较小,水深6~8 m处冲刷的最大深度约12 m。研究区的波浪作用及海流作用增强了海底的作用力,导致上层沉积物表面存在多条冲蚀沟,这些都促使软弱地层进一步发育。

黄河流域泥沙含量较高,充足的泥沙供应以及由此引起的超压等都是海底滑坡的诱发条件^[17-19]。

有研究表明, 大陆边缘的活跃河口三角洲是海底滑坡的高发区域^[20], 黄河多沙善淤, 经历多次改道, 河口三角洲较为活跃, 由此可见, 黄河三角洲海底滑坡也属于海底滑坡易发区域。

由于海底斜坡所处的海洋环境复杂多变, 诱发其失稳的因素也是多方面的, 其中还包括一些不具初始破坏作用的因素, 如人类活动、海底斜坡坡度等^[20]。黄河三角洲地区油气资源丰富, 采油平台和钻井平台较多, 人类活动较为频繁, 这也在一定程度上促进了海底滑坡的发生。因此, 有必要对该地区的海底滑坡条件做进一步的调查和研究。

4 结论

本文通过对埕岛海区开展物探研究工作, 揭示了黄河三角洲海底滑坡诱发条件, 研究结果表明: 埕岛海区海底地形整体较平坦, 呈西高东低的趋势。存在多条流控冲蚀沟, 整体冲刷趋势是以 6~8 m 水深线范围内冲蚀沟较深; 该研究区域以外向岸、向海冲刷量逐渐减小, 同时软弱土层较为发育, 冲蚀沟地层扰动较为明显, 是海底滑坡的潜在诱发条件, 有必要开展更深层次的调查和研究。

参考文献:

- [1] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: advances and challenges[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(39): 193-212.
- [2] Masson D G, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364(1845): 2009-2039.
- [3] 冯秀丽, 林霖, 庄振业, 等. 现代黄河水下三角洲全新世以来土层岩土工程参数与沉积环境之间的关系[J]. *海岸工程*, 1999(4): 1-7.
- [4] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 19-27.
- [5] 李安龙, 杨荣民, 曹立华, 等. 黄河水下三角洲海底斜坡波致稳定性分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(2): 273-280.
- [6] 蒲高军, 冯秀丽, 赵维霞. 现代黄河三角洲埕北海域海底滑坡分析[C]//渤海湾油气勘探开发工程技术论文集(第十集), 东营: 中国石化出版社, 2005: 167-171.
- [7] 李海东, 杨作升, 王厚杰, 等. 现代黄河水下三角洲地质灾害现象的空间分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 37-43.
- [8] 彭俊, 陈沈良, 陈一强, 等. 黄河三角洲侵蚀性岸段水下岸坡地质灾害及其空间分布[J]. *海洋通报*, 2014, 33(1): 1-6.
- [9] 肖鹏, 李安龙. 基于 GIS 的黄河水下三角洲海底滑坡稳定性预测[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(3): 221-226.
- [10] 赵景蒲, 贺森, 张建英, 等. 东营市近海海域灾害地质类型及特征分析[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(7): 55-60.
- [11] 曹成林. 波浪作用下埕岛海域海底冲刷预测评价[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2010.
- [12] 文明征, 王振豪, 张博文, 等. 黄河水下三角洲浮泥层分布与扰动地层调查研究[C]//2018年全国工程地质学术年会论文集, 西安: 科学出版社, 2018: 686-692.
- [13] 翟科. 埕岛海区海底不稳定性差异对工程设施的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [14] 马云. 南海北部陆坡区海底滑坡特征及触发机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [15] Prior D B, Coleman J M. Submarine landslides-geometry and nomenclature[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie N F*, 1979, 23: 415-426.
- [16] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 海底滑坡分类及成因机制研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 153-163.
- [17] Schwab W C, Lee H J, Twichell D C. Submarine landslides: selected studies in the U. S. exclusive economic zone[J]. *U. S. geological Survey Bulletin*, 1993.
- [18] 何叶, 钟广法. 海底滑坡及其反射地震识别综述[J]. *海洋科学*, 2015, 39(1): 116-125.
- [19] 刘敏. 复杂环境下海底斜坡稳定性解析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [20] Hampton M, Lee H. Submarine landslides[J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34(1): 33-59.

TRIGGERING FACTORS OF SUBMARINE LANDSLIDE IN THE YELLOW RIVER DELTA: TAKE THE CHENGDAO AREA AS AN EXAMPLE

ZHAO Dongdong¹, CHENG Haiyan^{1,2,3}, LIN Fansheng^{1,2,3}, QIN Xianke^{1,2,3},
ZHU Xiankai¹, CHEN Xiaocheng¹, ZHANG Chao¹

(1 Qingdao Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: Two submarine cables at the Yellow River underwater delta broke in November 2003, presumably owing to the relatively developed erosion ditches and landslide in the area. Geological survey was undertaken later in the Chengdao area in order to find out the reasons and conditions of the event. Various geophysical methods, such as multi-beam sounding, shallow profile exploration and side scan sonar survey, are applied. It is found that there do occur many erosional gullies on the sea bottom in the Chengdao area. Soft soil layers are common. Sediment disturbance are obvious in erosional trenches by the actions of wave and current. Based on the analysis of wave and current influences on seabed soil, the development degree of the erosional ditches and their relationship with water depth and soil properties are revealed. Upon the basis, triggering conditions of the seabed landslide are worked out. Increasing human activity is also the factor to be considered for the submarine landslide happened in the study area.

Key words: Yellow River Delta; submarine landslide; erosion ditch; sediment disturbance