

doi: 10.12029/gc20200516

陈珊珊, 王中波, 张勇, 张志珣, 赵维娜, 钟伟杰. 2020. 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, 47(5): 1512–1529.
Chen Shanshan, Wang Zhongbo, Zhang Yong, Zhang Zhixun, Zhao Weina, Zhong Weijie. 2020. 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, 47(5):1512–1529(in Chinese with English abstract).

东海北部外陆架及邻区灾害地质体特征及成因研究

陈珊珊^{1,2,3}, 王中波^{1,3}, 张勇^{1,3}, 张志珣^{1,3}, 赵维娜^{3,4}, 钟伟杰⁵

(1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 4. 西北工业大学青岛研究院, 山东 青岛 266200; 5. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104)

摘要:基于“1:100万海洋区域地质调查”项目在东海北部实测的高分辨率浅地层剖面资料,对东海北部外陆架及邻区主要灾害地质体的内部反射结构、外部形态等地震反射特征进行了总结,识别出了高角度活动断层、海底火山、岩浆底辟、海底滑坡、埋藏古河道、埋藏古三角洲、古潮流沙脊等多种灾害地质体类型,并对这些海洋灾害地质体的分布、成因以及各种灾害地质体对海上油气勘探及海洋工程建设的影响等多个方面进行深入的探讨。这些灾害地质体的识别可以很好的为该区的海上生产活动及工程建设提供减灾防灾参考。

关键词:灾害地质体; 浅地层剖面; 海洋地质调查工程; 东海北部外陆架

中图分类号: TE122 文献标志码: A 文献编号: 1000-3657(2020)05-1512-18

Characteristics and origin of disaster geological bodies in the northern outer shelf of the East China Sea and its adjacent areas

CHEN Shanshan^{1,2,3}, WANG Zhongbo^{1,3}, ZHANG Yong^{1,3},
ZHANG Zhixun^{1,3}, ZHAO Weina^{3,4}, ZHONG Weijie⁵

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Qingdao Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Qingdao 266200, Shandong, China; 5. Shandong Coal Field Geological Planning and Exploration Institute, Jinan 250104, Shandong, China)

Abstract: Based on the high-resolution shallow seismic profiles measured in the northern outer shelf of the East China Sea by the "1:100,000 marine regional geological survey" project, the authors summarized the internal reflection structure, external morphology and other seismic reflection characteristics of the disaster geological bodies in the northern outer shelf of East China

收稿日期: 2019-12-25; 改回日期: 2020-07-07

基金项目: 国土资源部地质调查专项(DD20160137, GZH201400201, DD20160138, DD20190208, DD20190205), 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目(MGE2019KG01), 国家自然科学基金项目(41706069, 41876059, 41806048)联合资助。

作者简介: 陈珊珊, 1982年生, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋环境地质调查研究; E-mail: yangfan662001@163.com。

通讯作者: 王中波, 1979年生, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积和第四纪地质研究; E-mail: wangzhongbo@mail.cgs.gov.cn。

Sea, and identified various types of hazard geological bodies such as high angle active faults, submarine volcanoes, magmatic diapirs, submarine landslides, buried ancient channels and buried ancient delta and tidal sand ridges. The distribution, genetic mechanism of various disaster geological bodies were concluded, and the influence of disaster geological bodies on marine oil and gas exploration and marine engineering construction were discussed. The identification of these disaster geological bodies can provide valuable references for the marine production activities and engineering construction in the study area.

Key words: disaster geological body; shallow seismic profile; marine geological survey engineering; northern outer shelf of the East China Sea

About the first author: CHEN Shanshan, female, born in 1982, master, senior engineer, mainly engages in marine environmental geological survey; E-mail: yangfan662001@163.com.

About the corresponding author: WANG Zhongbo, male, born in 1979, doctor, senior engineer, mainly engages in the study of marine geology and Quaternary geology; E-mail: wangzhongbo@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by Geological Survey Project (No. DD20160137, No. GZH201400201, No. DD20160138, No. DD20190208, No. DD20190205), Open Fund of Key Laboratory of Marine Geology and environment, Chinese Academy of Sciences (No. MGE2019KG01), and National Natural Science Foundation of China (No. 41706069, No. 41876059, No. 41806048).

1 引言

东海拥有宽广的陆架、复杂的陆坡和年轻的弧后盆地(秦蕴珊, 1987; 金翔龙, 1992), 是近年来海底资源开发的目标区域。东海北部外陆架及邻区属于深水区(图1), 地貌类型多样(范奉鑫和林美华, 1999; 范奉鑫等, 2000), 地质环境复杂, 且含有丰富的海洋油气与天然气水合物资源(郭军华等, 2007)。因此, 其海底灾害地质的研究对于油气及天然气水合物资源的勘探、海岛开发、海上钻井平台与沿岸工程建设等提供科学依据。

灾害地质是指自然发生的或人为造成的、对人类生命或财产造成危害或潜在危害的地质条件或地质现象, 其研究对象是地质类致灾因子, 包括地质体、地质现象及其发生发展机制、分布规律等(李培英等, 2007)。随着“海洋强国”战略的提出, 近年来海洋资源的开发和利用得到蓬勃发展, 海上工程建设也日益增多, 海洋灾害地质方面的研究显得越来越重要(李凡等, 1991, 1994; 陈俊仁等, 1993, 1996; 冯文科等, 1994; 冯志强等, 1994; 夏真等, 1999; 刘守全等, 2000, 2002; 李西双等, 2002; 刘锡清等, 2002, 2005; 周良勇等, 2004; 胡刚等, 2007; 李成刚等, 2007; 张志忠等, 2007; 李培英等, 2007; 杜军等, 2008; 孙杰等, 2010; 杨文达等, 2011; 李泽文, 2011; 周川等, 2013; 刘杜娟等, 2014; 陈晓辉等, 2014; 马云等, 2014; 2017; 张永明等, 2017; 朱友生等, 2017; Ning et al., 2019), 目前对东海的灾害地质

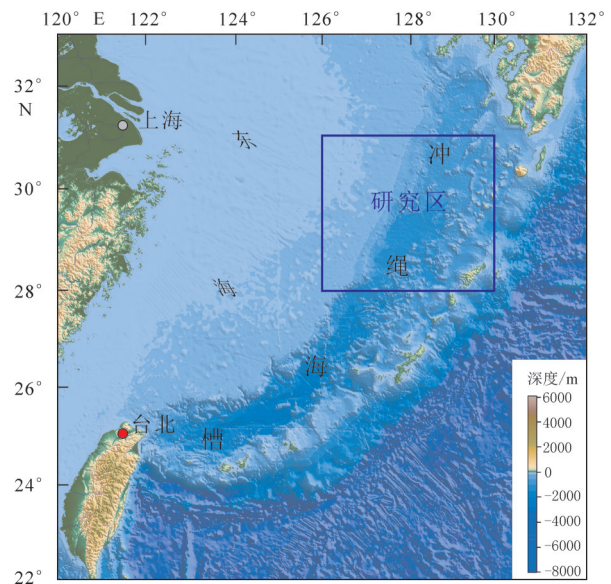


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

研究也积累了一些成果(鲍才旺等, 1993; 杜军等, 2004; 刘乐军, 2004; 刘杜娟等, 2010; 叶银灿, 2012), 特别是针对东海陆架区灾害地质的研究较多, 但东海外陆架及邻区由于水深较深, 离岸较远, 工作技术方法受限, 研究相对薄弱。

2 地质背景

研究区位于东海北部外陆架及邻区的深水区, 其经纬度范围为28°N~31°N、126°E~129°E, 水深范围在60~1000 m。研究区的地貌单元主要包括东海

外陆架、大陆坡、冲绳海槽、琉球岛弧四个部分。研究区大地构造位置独特,是西太平洋沟弧盆体系的一部分,也是太平洋板块向欧亚板块俯冲与欧亚板块和菲律宾板块碰撞动力体系的交汇处(赵金海, 2004)。新生代以来经历了复杂的构造运动,特别是位于大陆坡处,新构造运动活跃,构造地震、浊流、重力流及海底滑塌等极其发育,形成了复杂而且多样的地貌类型。同时,由于海平面的变化,残留的沙脊、古河道、古三角洲等地貌类型也普遍发育,造就了研究区多种灾害地质类型(李西双, 2002;刘杜娟, 2010)。

3 方法

本文使用的高分辨率浅地层剖面资料是基于“中国海域1:100万海洋区域地质调查”项目,由中国地质调查局青岛海洋研究所于2013—2014年采集的,调查船为中国海洋大学“东方红2号”;导航定位采用美国NAVCOM公司出品的SF-3050定位系统;震源使用法国SIG公司的SIG 2Mille型发射功率为160~2000 J(多档可选);数据采集控制系统使用英国Geoacoustics公司的GeoPro LC型采集系统,震源类型为电火花,采集参数见表1。

4 研究结果

4.1 海洋灾害地质体类型

东海外陆架及邻区的灾害地质体主要发育于晚更新世以来最低海平面-高海平面变化过程中,

表1 浅地层剖面施工采集参数表

Table 1 Acquisition parameters of shallow seismic profile

震源类型	电火花
震源沉放深度	(1±0.5) m
震源总能量	750 J、1000 J
震源频谱宽度	100~1000 Hz
放炮间隔	1.2~2 s
采样率	0.2 ms
记录长度	0.8~2.0 s

基于特殊的“陆架-海槽”系统(金翔龙, 1992;赵金海, 2004),在东海外陆架及邻区形成各种类型的灾害地质体,主要包括活动断层、海底火山、岩浆底辟、泥底辟、埋藏古河道和古湖泊、埋藏古三角洲、潮流沙脊、海底峡谷、海底滑坡等(图2)。

前人有关海洋灾害地质类型的分类,主要是根据灾害地质的危害程度(Carpenter et al., 1980;李凡, 1994)、具体形态特征(Willian et al., 1986)、成因、空间分布及其活动性(冯志强等, 1996)、内外动力体系及空间分布(刘守全等, 2000, 2002;刘锡清, 2002;刘锡清等, 2005)、直接或间接影响程度及成因相结合(李培英等, 2007)等标准,因此,灾害地质类型划分方案并不统一。本文总结前人有关灾害地质的分类原则,结合研究区实际采集的地质地球物理资料的解释成果,以及在此基础上获取调查区海域的地形地貌、地层结构、沉积物类型、地质构造、环境演变等内容,以实用简洁为原则,采用刘守全等(2000, 2002)的分类标准,将研究区的灾害地质体按空间分布分为海底表层和海底浅层两部分(表2)。海底表层类包括潮流沙脊、潮流冲刷槽、海底火山、海底滑坡、海底峡谷等地质体;海底浅层类包括活动断层、地震、埋藏古河道和古湖泊、埋藏古三角洲、埋藏古潮流沙脊、岩浆底辟、泥底辟等地质体。

4.2 灾害地质体特征及其分布

4.2.1 海底表层类灾害地质体

(1) 活动断层与地震

活动断层由于其对工程潜在巨大影响,一直受到各方面的关注(徐锡伟, 2006)。这里将活动断层定义为新近纪以来活动过的、正在活动或断续活动并具有潜在活动可能性的断层。在浅地层剖面上,断层表现为一个或多个连续性好的反射波组发生系统的错移,有的表现为两盘厚度不一致、地层发生弯曲,有的则表现为反射层终止或减薄,还有的两侧反射特征不一致。高分辨率浅地层剖面上分析发现东海外陆架-冲绳海槽地区的断层多为高

表2 研究区灾害地质体分类

Table 2 Classification of disaster geological factors

类别	灾害地质体
海底表层类	潮流沙脊、潮流冲刷槽、海底火山、海底滑坡、海底峡谷、海底扇、侵蚀陡坎
海底浅层类	活动断层、地震、埋藏古河道和古湖泊、埋藏古三角洲、埋藏古潮流沙脊、浅埋基岩、浅层气、岩浆底辟、泥底辟

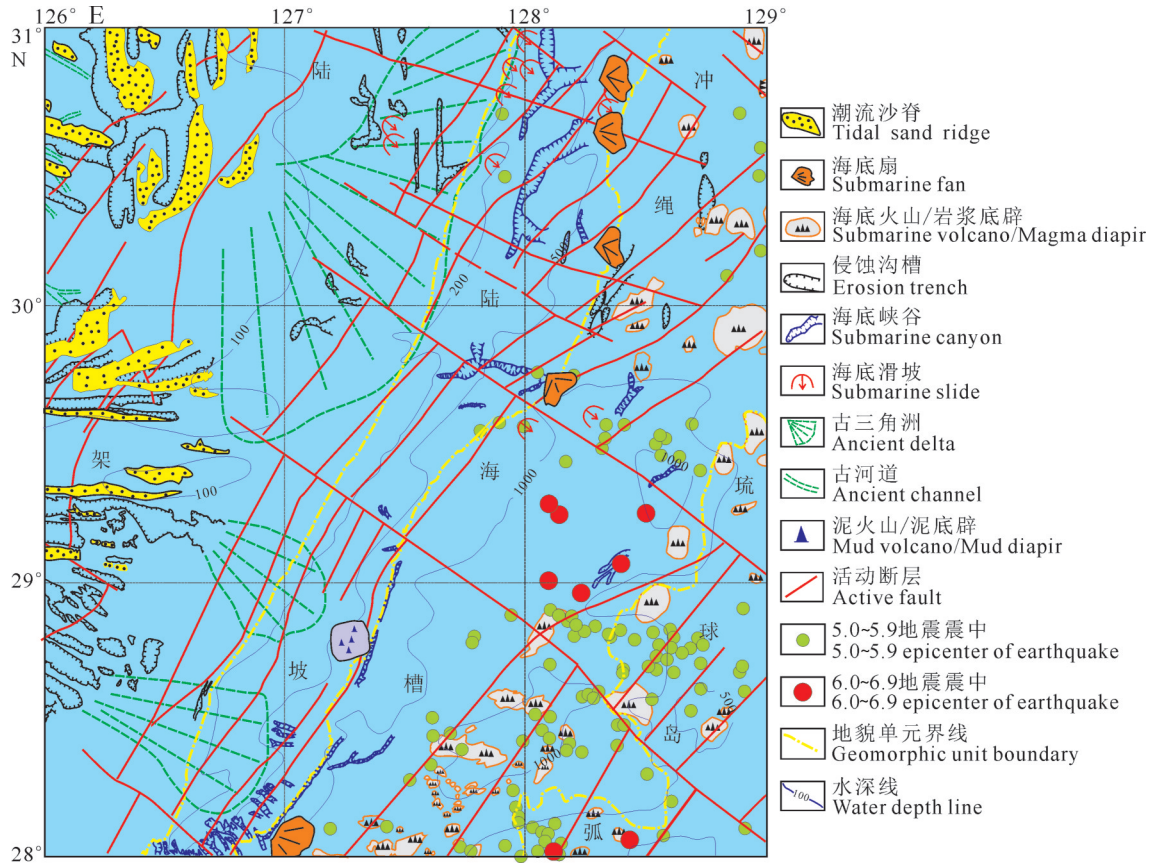


图2 研究区灾害地质体分布图

Fig.2 Distribution map of disaster geological bodies

角度的活动正断层(图3)。绝大多数断层是从剖面的底部起始的,随着沉积层由下而上,新的断层在原来的位置上继承性向上发育,断距越来越小,为现代活动断层。剖面的断层多处具有集束性,即多条断层性质一致、几何参数基本一致,密集分布,形成一个大的

断裂带,本文将这样的断层带称为集束断层带。该区的集束断层带通常由数十条断层组成,均是高角度的正断层,NNE向,基本都断穿了海底10 ms 以下的地层,研究认为断层的成因与冲绳海槽晚更新世岩浆活动有关(金翔龙,1992;赵金海,2004)。

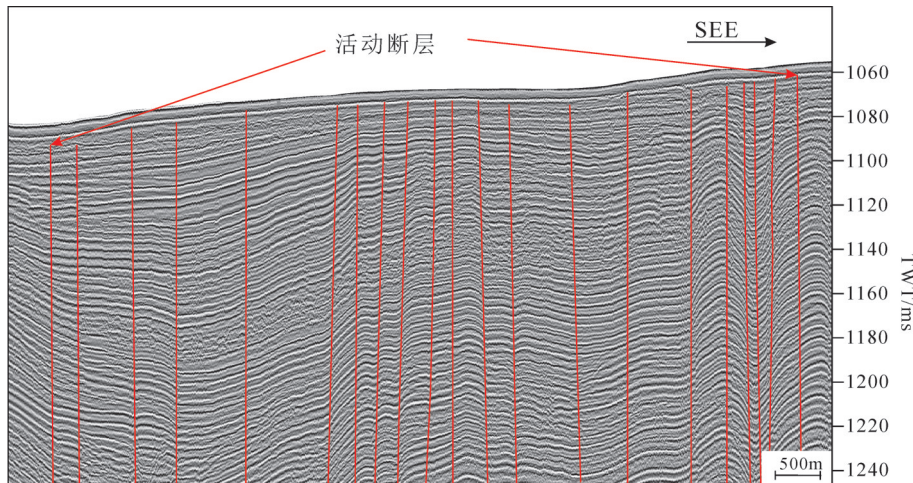


图3 活动断层典型浅地层剖面

Fig.3 Typical shallow seismic profile of active faults in the study area

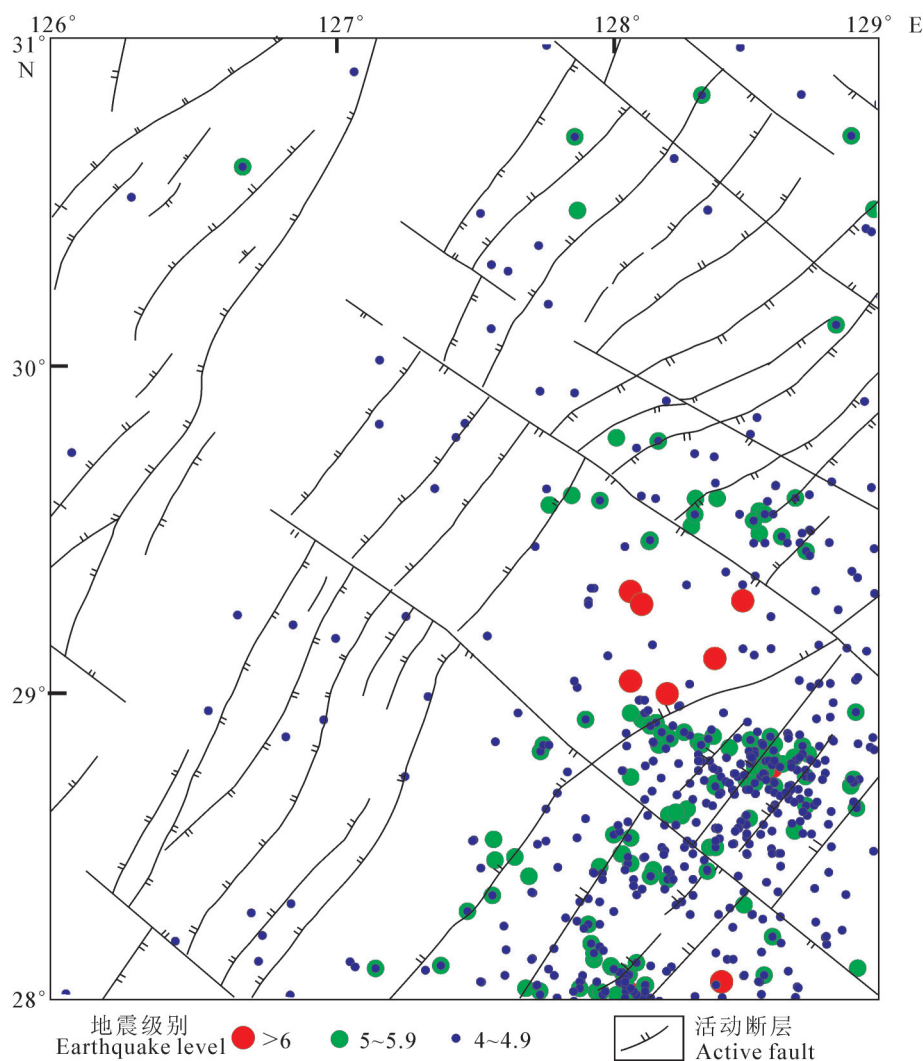


图4 研究区的活动断层与地震

Fig.4 Distribution of active faults and earthquakes in the study area

地震是构造运动的一种表现形式,地震一般被认为与活动断层关系密切(徐锡伟,2006)。研究区的活动断层密集分布(图4),历史上曾发生过多次强震,据中国地震台网中心1964年以来的地震数据显示,6级以上的地震有16次。其中,5~5.9级地震有500多次,4~4.9级地震1200多次,3~3.9级的地震接近60次。断层的活动性通常与现代地震震中的分布具有较好的对应关系,从图4可以看出,研究区震中主要集中分布在调查区的东南,总体呈NE-NNE向趋势,与断层的分布位置及整体走向一致。研究区最新地震资料显示,2015年11月13日在东经128.75°北纬31.05°发生7.3级的大地震,这是自1964年以来记录的最大震级的地震,推断该地震与

这些高角度的活动断层有很大的相关性。

(2)海底火山

海底火山在地貌上表现为海岭与海丘。海岭是高出周围海底1000 m以上的海底山地,海丘是高出周围海底1000 m以下的海底丘陵,在冲绳海槽都有广泛分布(图2)。海底火山的岩浆侵入上伏地层,并出露海底,造成海底表面异常崎岖,地形变化很大,谷状负地形和脊状的正地形共存,在地震剖面上主要表现为刺穿海底地层,有典型的外形轮廓,低频强反射,内部杂乱不连续,反射等特征(图5a)。未出露海底的称为岩浆底辟(图5b)。研究区大量的地震剖面表明,东海大陆坡及冲绳海槽处岩浆作用非常强烈,琉球群岛附近发育大片的海底火山和岩浆底辟(范奉鑫和林

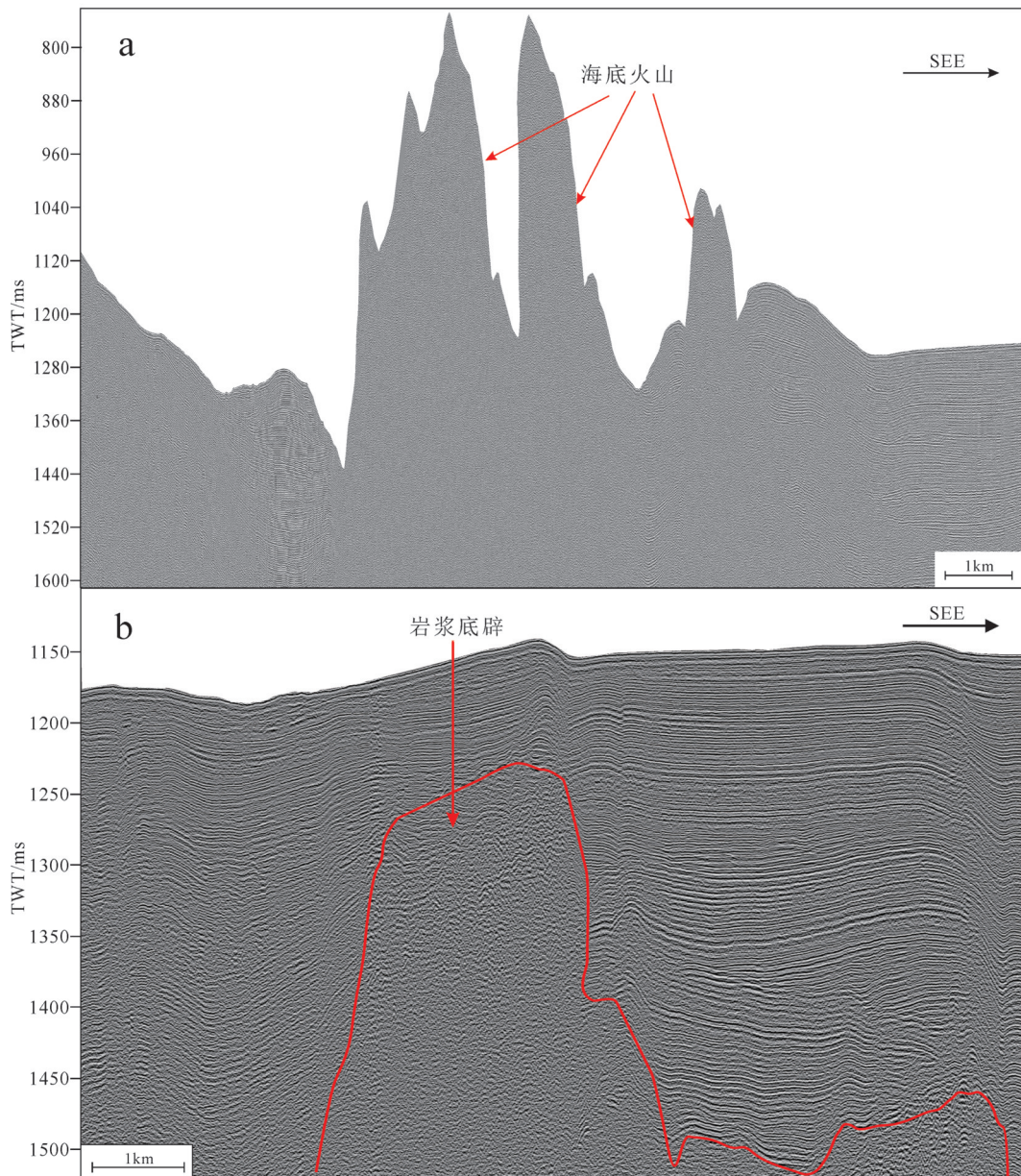


图5 海底火山(a)与岩浆底辟(b)的典型浅地层剖面

Fig.5 Typical shallow seismic profile of submarine volcano (a) and magma diapir (b) in the study area

美华, 1999; 范奉鑫等, 2000)。

4.2.2 海底表层类灾害地质体

(1) 潮流沙脊

潮流沙脊是一种活动性较强的砂质脊状堆积体, 一般形成于往复的潮流区、沙源供应充足、潮流流速在2~3 kn的水动力环境中(Liu et al., 1998; 刘振夏等, 2004; 吴自银等, 2006)。潮流沙脊一般成群分布, 并且脊槽相间。沙脊长轴沿着潮流的方向延伸, 沙脊往往呈不对称的丘形, 两侧斜坡处往往发育沙波。在浅地层剖面上, 因测线与潮流沙脊相

交的位置与角度不同, 而呈现出各种不同的形态, 潮流沙脊总体形态多为不对称的丘状或山脊状, 具有高频弱反射特征, 多为斜交前积反射结构且层理清晰, 沙脊的底部与下伏地层呈假整合接触, 沙脊顶部一般覆盖有活动沙丘(图6)(杨文达, 2002; 杜文博等, 2007; 陈晓辉等, 2012; 陈珊珊等, 2016)。研究区潮流沙脊十分发育, 主要出现在西部的陆架区, 呈NW-SE走向(图2), 大多数沙脊具有北坡较缓、南坡较陡的不对称形态。刘振夏等(2004)认为现代潮流流速较小, 无法形成大型沙脊地貌, 因此东海现有的

沙脊应为残留沙脊。研究区陆架残留沙脊在现代海底动力的作用下,发生侵蚀迁移,沙脊纵剖面显示的顶削蚀斜层理指示了沙脊的迁移方向(图6)。

(2)潮流冲刷槽、侵蚀陡坎

潮流冲刷槽为强潮流作用下海水强烈冲刷、侵蚀海底表面而形成的海底负地形,与潮流沙脊相间分布(图6),潮流冲刷槽多与涨、落潮底流主流向平行延伸,可穿越多种地貌单元。有些大型侵蚀槽谷沿NW-SE向横穿东海陆架,构成主要的潮流通道。小型冲刷沟槽沿局部地形坡向发育,海底斜坡、沙脊的边缘斜坡上,均有小型侵蚀沟槽发育,沟槽深度通常在5~10 m。有的海底沟槽内无后期充填物,沟壁较陡,槽底通常为较粗的砂质沉积物,表明冲刷还在进行;有的沟槽内则充填有数米厚的泥质松散沉积物,沟壁较平缓或一侧较陡,沟底宽阔,表明冲刷已经停止。

陡坎往往是受到侵蚀、断层错断或滑坡体滑塌形成的,一般位于潮流沙脊与冲刷沟槽之间的陡壁上及海底滑坡的滑坡壁上,分别与潮流冲刷槽或海底滑坡伴生,在大陆坡、冲绳海槽深海平原的海山海丘及琉球群岛的岛坡上都有分布(图2)。

(3)海底峡谷

海底峡谷是发育在大陆坡和岛坡上的峡谷地貌,浅地层剖面形态一般呈深切的“V”型(图7),谷坡的坡度和谷底的纵向坡度都很大。海底峡谷的形成一般是受构造断裂控制,特别受活动断裂控制,这些地方地震频发,非常容易诱发崩塌、滑坡,产生大量碎屑物质,形成浊流,从而加深和拓宽海底峡谷(殷绍如等,2015;刘杰等,2016;李学杰等,2017;聂鑫等,2017;刘丛舒等,2019;田洁等,2020;伊善堂等,2020)。

研究区海底峡谷主要分布在冲绳海槽西侧的东海陆坡(图2)。其中,冲绳海槽西坡的大部分海底峡谷同时又是陆坡浊流通道,有些峡谷一直延伸到东海陆架平原,成为东海陆架向冲绳海槽输送沉积物的主要通道。冲绳海槽西坡浅地层剖面显示,受断层活动及块体搬运引起的侵蚀作用影响,两侧的谷壁上沟坎发育,谷缘物质松散,沉积物受到侵蚀,在地形上表现为阶梯状。谷底次级侵蚀沟槽发育,显示了沉积物块体运动对谷底强烈的侵蚀作用。海底峡谷的谷体是峡谷内部沉积物搬运的通

道,以侵蚀作用为主,但局部存在沉积作用。图7所示的下切峡谷水深380 m,谷深45 m左右,宽达数十千米。海底峡谷的顶部以侵蚀作用为主,向下切割下覆沉积地层,具有典型的V型截面。冲绳海槽东北部浅部地层受断层活动及块体搬运引起的侵蚀作用影响,两侧的谷壁上沟坎发育,谷缘物质松散,沉积物受到侵蚀,在地形上表现为阶梯状。谷底次级侵蚀沟槽发育,显示了沉积物块体运动对谷底强烈的侵蚀作用。

(4)海底滑坡(滑塌)

海底滑坡是大量沉积物在重力作用下,块体沿一定的滑动面从高处向低处整体下滑的过程,形成滑坡体。海底滑坡的发生,需要有一定的地形坡度,坡上有较厚的不稳定松散沉积物(冯文科等,1994;孙运宝等,2008;吴时国等,2008;刘锋,2010;陈泓君等,2012;陈珊珊等,2012;马云等,2012;王磊等,2016)。东海冲绳海槽地区构造复杂,断裂发育,新构造作用活跃,东海陆坡海底地形呈阶梯状逐级下降,在陆坡上发育有海丘、海谷、海蚀崖、水下阶地(逐级下降的反坡向台坎),以及陆坡海槽等与滑塌有关的各种特殊构造地貌和地质体(李成刚等,2007)。滑塌沉积体中又发育大量的层间滑塌断层,其规模不一,数量众多。该地形特征主要与陆架边缘的基底断裂有关,研究区的高角度正断层,呈NNE向且反向断阶型列布,其阶梯状的张性引牵,使整个大陆边缘向深水区蠕散前展,同时由于海平面波动,共同诱发海底地形地貌的不均衡发育,具有更大的活动性。大型的滑坡主要发生在冲绳海槽西坡(图2),因为那里具有足够的地形坡度,坡上有较厚的来自东海陆架新生代的不稳定松散沉积物。而且,断裂、地震等构造活动十分活跃。在东海冲绳海槽附近海域识别出了多处海底滑坡,一般由滑坡后端、滑坡体和滑坡前缘三个部分组成,具有5个明显的微地貌单元,即滑坡陡壁、滑坡谷、滑移台阶、丘状滑坡体和沉积物流舌状体。该区滑坡还具有多期次特征,不同期次的滑坡规模大小不一,但每期滑坡都明显的滑移面,滑移面之上可见滑坡陡壁及滑坡体(图8)。

(5)海底扇

海底扇是海底浊流经海底峡谷流出峡谷口后,由于海底坡度迅速变缓、地形突然变开阔,浊流流

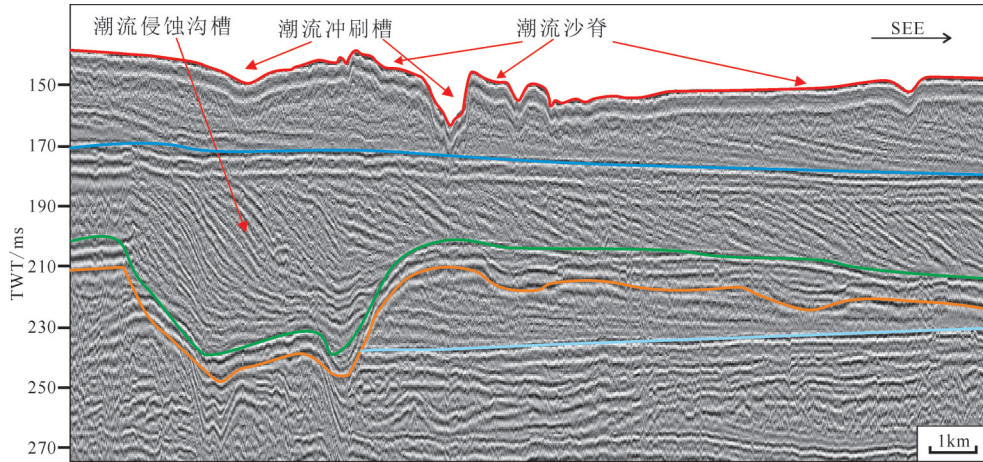


图6 潮流沙脊典型浅地层剖面
Fig.6 Typical shallow seismic profile of tidal ridge

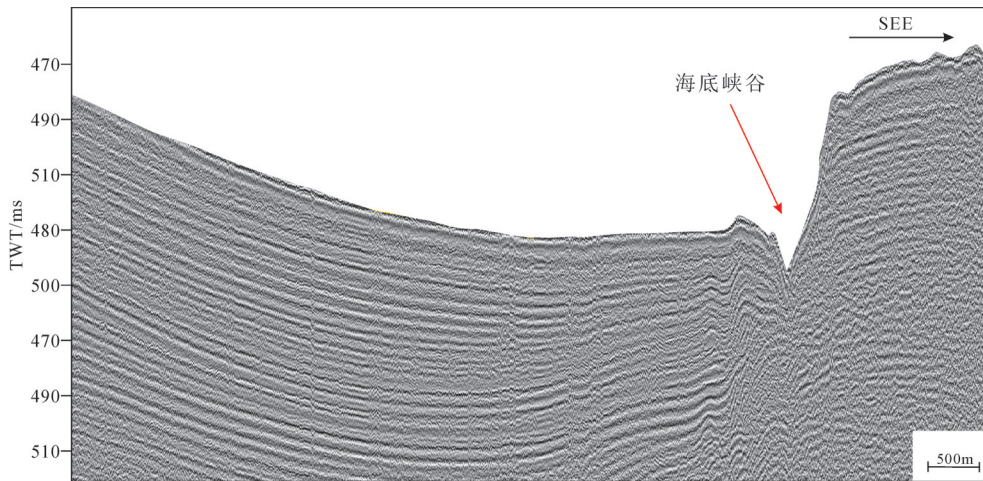


图7 海底峡谷典型浅地层剖面
Fig.7 Typical shallow seismic profile of submarine canyon

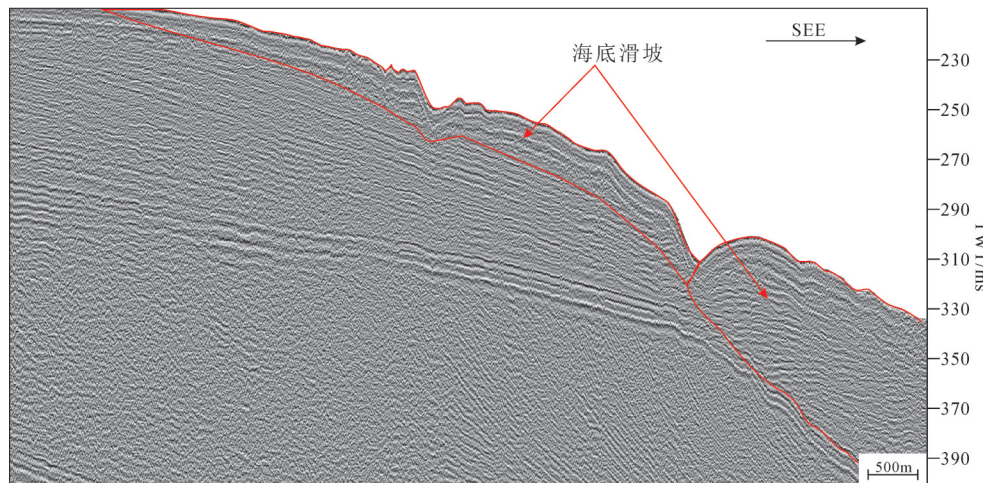


图8 海底滑坡典型浅地层剖面
Fig.8 Typical shallow seismic profile of submarine slide

体迅速分散、流速迅速降低,它所携带的大量泥沙在谷口地区迅速沉积而形成的扇形堆积体。研究区冲绳海槽槽底平原靠近大陆坡脚处存在着多处海底扇(图2)。

4.2.3 海底浅层类地质体

(1)埋藏古河道与古湖泊

埋藏古河道、古湖泊是海平面下降,陆架区裸露成陆,其上发育各种规模的河道和湖泊。后期,随着海平面大幅度上升,早期的河道则被后期的沉积地层所覆盖,并且绝大部分埋藏于不同厚度的沉积物之下,形成埋藏古河道或古湖泊。由于古河流的特征不同,测线与河流相交的角度不同,在高分辨率浅地层剖面上,出现各种不同的断面特征,以“U”字型几何形态为主,地球物理特征一般为中低频强反射的高角度倾斜、波状及杂乱反射结构(冯志强等,1994;鲍才旺,1995;陈俊仁,1996;胡刚等,2007;李成钢,2007;李泽文,2011;陈晓辉,2014)。研究区所处的东海陆架广阔,地形平坦,更新世以来海平面多次升降,东海陆架曾经大部分裸露,谷状负地形即是低海平面时期河流在陆架作用的结果。通常完整的古河流沉积下部是河道沉积,底部有砂砾堆积,形成滞留沉积,地震反射特征为杂乱反射;上部为泥沙互层河道充填沉积,地震反射特征为平行层理。东海外陆架西部识别出两期典型的古河道沉积(刘振夏等,2000;夏东兴等,2001;陈珊珊等,2019)(图2,图9),宽数十千米,下切深度达数十米,顶部是海侵河道充填沉积,河道内部出现高角度的交错层理,反映了极强的水动力条件。

(2)埋藏古三角洲

研究区埋藏古三角洲是低海平面时期的河流入海形成的并且已呈埋藏状态的古三角洲。地震剖面中的古三角洲前缘的垂向层序结构十分清晰,三角洲前缘相有大尺度交错及复合S型的前积反射结构,具高连续性、中高频和强振幅的声学特征(鲍才旺等,1995;范奉鑫等,1999,2007;刘振夏等,2000)。大部分三角洲前缘相保持相对完整,前积层反射结构明显,内部斜层理发育。研究区浅地层剖面上发现,在冲绳海槽北段陆架破折线附近发育了两期高角度前积反射结构的地层(图2,图10),且规模较大,具有明显三角洲沉积的特征。埋藏古三角洲的发现可能与晚更新世以来黄河或长江等大

型河流从冲绳海槽北部入海有关(范奉鑫等,2007)。

(3)泥底辟

泥火山与泥底辟主要是由地壳深部密度较小的高塑性欠压实泥页岩,在高度塑性的地质体和高应力作用区,当其受到外力和地震作用时,喷出海底的会形成泥火山,未喷出的形成泥底辟(王芝尧等,2016;宋瑞有等,2017;雷玉婷等,2019)。在研究区的东南部(28°50'N,127°20'E附近)发现数十座泥火山,顶部具有丘状外形。在切过泥火山的浅地层剖面上发现很多泥底辟,泥火山与泥底辟是在侧向挤压力的作用下,塑性较高的泥质沉积变形上拱,上拱物质切断了两侧连续的沉积层,内部呈空白反射(图11)。研究表明,泥火山、泥底辟的存在与油气及水合物的成藏具有重要相关性(何家雄等,2012)。

5 讨 论

5.1 灾害地质体成因

(1)构造成因

研究区位于东海东部太平洋板块向欧亚板块的俯冲带上,自西向东依次由冲绳海槽张裂带、琉球岛弧隆起带和琉球海沟等构造单元组成。冲绳海槽所在的“沟-弧-盆系”是西菲律宾海板块与亚洲大陆板块俯冲、碰撞所形成,因此该区构造变形极为复杂(赵金海等,2003)。李乃胜(1988)认为冲绳海槽构造活动从中新世晚期开始,在大陆边缘产生一系列走向断裂,南部的拉张海盆迅速被上新世沉积物充填,更新世早期或晚上新世基本上奠定了现今的构造格局。高角度活动断层、地震、岩浆底辟、海底火山等都是在这一构造背景下形成的灾害地质类型。

冲绳海槽的构造形式表现为明显的拉张裂陷性质,除发育顺海槽走向伸展的NNE向平行断裂系外,尚分布一系列NW向与海槽走向斜交或正交的横切断裂系。断裂系主要由大量的高角度正断层组成,伴随着海槽内出现的地堑状裂陷盆地而存在。平行断裂系的断裂线皆沿裂陷盆地的轴向展布,断续地纵贯整个海槽(图2,图4)。

中生代以来,受太平洋板块俯冲的影响,构造运动较为频繁,岩浆活动也十分强烈。在东海区域

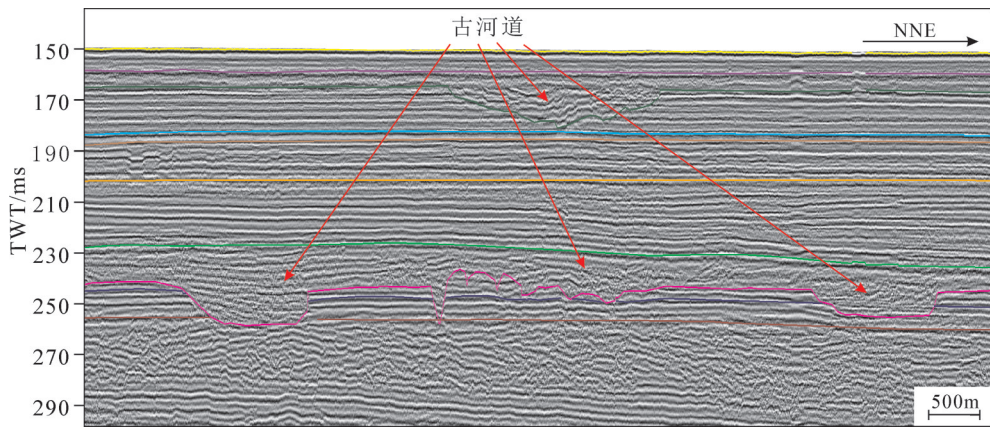


图9 埋藏古河道典型地震反射特征
Fig.9 Typical seismic reflection characteristics of buried paleo-channel

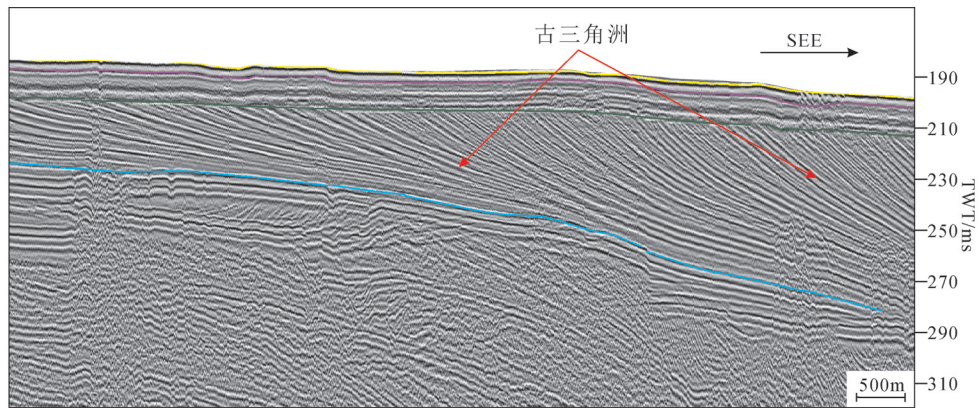


图10 埋藏古三角洲典型浅地层剖面
Fig.10 Typical shallow seismic profile of buried paleo-delta

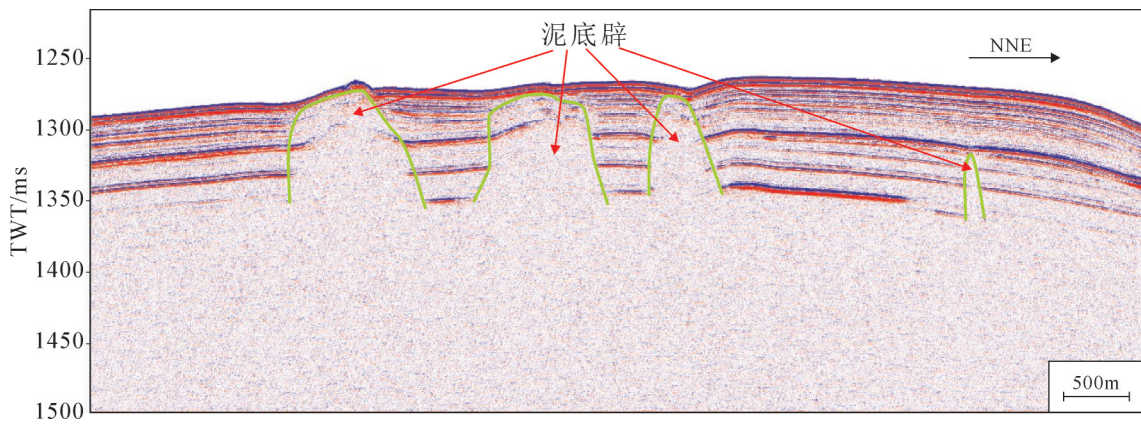


图11 泥底辟地震反射特征
Fig.11 Typical seismic reflection characteristics mud diapir

内,岩浆活动的范围非常广泛,从西到东,从南到北,无论在隆起或盆地中到处都有岩浆活动的痕迹(图2)。但由于海水和沉积物的覆盖,研究区内地震资料揭示的海底火山、岩浆底辟等都是大量岩浆活动形迹(图5)。

(2)海平面变化及水动力堆积侵蚀作用成因

晚第四纪以来,全球气候冷暖变化,造成冰期、间冰期的交替(郭炳火等,2004; Cooper et al., 2008; 顾明光等,2009; 陈晓辉等,2011; Kish et al., 2013; Ranasinghe et al., 2013; 高茂生等,2018; Mei et al., 2019; Wang et al., 2019),海平面也随之升降,在末次冰期,液态水变为固态水,海平面下降,发育多期的三角洲,随着海平面的进一步下降,在末次冰期最盛期,东海海平面最低处为现陆架区120~140 m水深处(缪卫东等,2016; 陈珊珊等,2019),陆架大面积裸露,水动力侵蚀作用增强,发育古河道、古湖泊;盛冰期之后,气候变暖,冰川融化,海平面开始回升,陆架区发生大规模海侵,在7 ka BP达到最大,海平面上升(李广雪等,2009),陆源物质在陆架处的堆积作用增强,在强潮流冲刷作用下,古长江口发育潮流沙脊。

总之,东海陆架第四纪频繁的海进海退和长江、黄河等大型河流的入海,以及海洋洋流、潮汐、波浪、风暴潮等海洋水动力侵蚀堆积作用都是古河道、古湖泊、古三角洲、潮流冲刷槽、侵蚀沟槽、侵蚀陡坎、海底峡谷发育的根本原因。古河道、古湖泊、古三角洲、潮流冲刷槽等通常发育在广阔的东海西部陆架上,而海底峡谷、侵蚀陡坎主要分布在海流作用强、断裂构造发育的陆坡、岛坡上。

(3)重力作用成因

海底滑坡是冲绳海槽西部陆坡上重力作用沉积的重要表现形式。中国大陆丰富的陆源碎屑物质及东海陆架上因潮流侵蚀作用而产生的物质供应和冲绳海槽西部陆坡较大的坡角造成冲绳海槽陆坡海底滑坡十分发育。海底滑坡的存在一般需要两个条件,一是存在丰富的沉积物来源,二是满足一定的坡度(James et al., 1999; Petter et al., 2005)。地震剖面上海底滑坡除呈边缘沟坎状外,还向海槽方向滑动,主要是由于陆坡沉积物在重力作用下滑移到海槽内部而形成的。水合物的分解和释放也可形成海底滑坡,天然气水合物的赋存需

要合适的温度、压力环境,海底滑坡作用可以导致局部区域的沉积物的快速堆积,从而产生局部的压力屏蔽作用,此时如果屏蔽内部存在较为充足的水合物气体时,天然气水合物较容易形成。此外,海底滑坡与天然气水合物稳定带底界BSR是有关的。BSR被认为是一个很特殊的剪切应力界面,其上覆的沉积物剪切应力减弱,是一脆弱带,在陆坡、岛坡倾斜角度与超孔隙流体压力的共同作用下,可以导致陆坡、岛坡沉积物的塌落、滑动产生海底滑坡堆积体。

海底滑坡的形成除重力作用因素外,构造运动及水动力作用也是导致该地质灾害的重要因素。冲绳海槽北段斜坡上部沉积物供应充足,无论缓坡和陡坡都容易产生海底滑坡;海槽的中、南段斜坡上部沉积物相对较少,但斜坡坡度较大、陆坡断裂带构造活动比较强烈,海底滑坡也较发育。

5.2 灾害地质体对海上工程建及资源勘探开发的影响

海底表层灾害地质体的稳定性对海洋工程的安全影响也很大,尤其是对于海底表面的光缆、油气管道等海底管线的危害最大。而海底浅层灾害体一般出现在海底表面之下几十米或百米之内,沉积层里存在埋藏的特殊地质体。一方面这些特殊的地质体可能由于上覆沉积层承载能力的差异,对钻井平台桩基造成危害。另一方面埋藏古河道、古湖泊处经常会存在浅层高压气,它们在上覆地层压力不断增大的情况下可能自行爆发式减压,也可能受到工程触发,对工程造成危害,特别是高压气囊可能造成重大井喷事故。具体表述如下:

(1)高角度活动断层

研究区活动断层形成的原因有两个:其一,断层的形成由深部构造引起,具有一定的继承性;其二,断层的形成与构造活动无关,而受控于沉积物的物理、力学性质。由于沉积物粒度、分选程度、密度、含水量、抗压和抗剪强度等差异,造成地层结构的不稳定,地层产生错动形成的。研究区断层断距不大,普遍具有自下而上断距相对减小的规律。沉积物快速充填,物理、力学性质不均一,容易导致沉积物层间错动。无论何种成因的断层,其引起的地层错动及其伴生的地面变形,会损害跨断层或建于附近的工程。

(2) 海底火山与岩浆底辟(浅埋基岩)

研究区的海底火山是不活动的,但未来也有可能转化为活动火山的可能性,且海底火山和浅部活动断层通常与构造活动相关,不仅会给海底工程造成直接破坏,而且会诱发滑坡、浊流、沙土液化,从而造成更大的危害。因此,海底火山的发育区是海洋资源开发和海底电缆铺设的不利区,另外,海底火山可以形成暗礁,琉球群岛的暗礁最为密集,对潜水艇及大型船舶的航行造成一定的障碍,容易发生事故。

与海底火山类似,岩浆底辟也是岩浆侵入形成的,刺穿或侵入周围地层但未刺穿海底,形成浅埋基岩。由于浅埋基岩尤其是基底起伏较大的基岩,因与围岩的差异,造成承载力不均,可能造成海底设施持力不均,从而导致建筑物歪斜甚至倒塌。浅埋基岩之上的海底表面基本上都是凹凸不平的,在其上建造海底设施是非常不利的。

(3) 泥火山与泥底辟

泥火山与泥底辟代表了高度塑性的地质体和高应力作用区,它们刺穿或侵入周围地层,因与围岩的差异造成承载力不均容易发生事故,特别是当其受到外力和地震作用时,泥底辟往往会形成泥火山,对海上钻井作业造成损害,应尽量避免。

(4) 埋藏古河道、古湖泊、古三角洲

由于河流、古湖泊填充物及三角洲沉积物的复杂性和多变性,即其粒度组分、分选程度、密度、剪切力等一系列物理性质和力学性质,在几米或几十米的水平距离内可能发生很大变化,受力不均;河道、古湖泊及古三角洲主要为砂质填充物所充填,孔隙度较大,具有较强渗透性,在长期侵蚀、冲刷及上覆荷载下,容易发生局部塌陷,使地层原有结构破坏,造成构筑物基础不稳定。另外,沉积物中含有大量的有机质,可能形成浅层气(叶银灿等,2003),因而对石油平台等工程设施具有不可忽视的潜在危险。莺歌海二井勘探平台曾在建设过程中由于施工位置处于古河道附近险遇灾情。勘探二号海洋钻井船在珠七井一号位钻遇古湖泊沉积物,被迫重新移位(陈俊仁等,1996)。

(5) 潮流沙脊

潮流沙脊地层含沙量较高,一般由细砂、中砂、粗砂组成。它们属于高速堆积体,沉积物含水量

大、固结性差、容易压缩、承载力较低、抗剪能力减少,使得海底土体不稳定,对各类海底工程造成不良影响和潜在威胁。潮流沙脊的存在使海底崎岖不平,给石油钻井工程建设、油气管线的铺设造成困难。

(6) 潮流冲刷槽和侵蚀坑、侵蚀陡坎

潮流冲刷槽是与潮流沙脊伴生的灾害地质,冲刷槽内海流流速快,侵蚀强烈,一般形成局部深凹地形,造成两侧槽坡陡峭,易发生滑坡,因此潮流冲刷槽对海底工程危害性也是极大的,容易造成灾害事故。

陡坎地形是在海平面上升过程中,海底遭受较强的冲刷作用而形成的,陡坎区地形崎岖不平,对海底管线铺设和维修都会产生很大困难。另外,在构造运动等外力作用的诱发下会引起海底滑坡或重力流等,要特别注意。

(7) 海底峡谷、海底滑坡与海底扇

海底峡谷是发育在大陆坡和岛坡上的峡谷地貌,横剖面形态一般呈深切的“V”型,谷坡的坡度和谷底的纵向坡度都很大。谷坡、谷底地形崎岖,不利于海底光缆的铺设,而且海底峡谷大多是浊流通道,往往能冲断光缆,所以海底工程一般应回避海底峡谷。海底峡谷的形成一般是受构造断裂控制,特别受活动断裂控制,这些地方地震频发,非常容易诱发崩塌、滑坡,产生大量碎屑物质,形成浊流,从而加深和拓宽海底峡谷。

海底滑坡与海底扇都是重力作用成因的灾害地质体,通常需要有一定的地形坡度,坡上有较厚的不稳定松散沉积物,而地震和断裂活动具有触发或加速海底滑坡以及海底扇的形成。海底滑坡的危害是巨大的,除了会引发海啸外,还直接危害钻井平台、海底光缆、港口、码头等海洋工程设施。海底扇是一种高速堆积体,沉积结构不均匀,粗细混杂,分选差,本质上存在着岩性不稳定性。同时,易发生顺坡向下蠕变现象,这种缓慢的蠕变可能造成海底电缆的断裂。

6 结 论

(1) 海底表层类的灾害地质体主要包括活动断层、地震、潮流沙脊、潮流冲刷槽、侵蚀陡坎、海底火山、海底峡谷、海底滑坡、海底扇、泥火山等;海底浅

层类的灾害地质体有埋藏古河道、埋藏古湖泊、埋藏古三角洲、岩浆底辟、泥底辟等。其中,埋藏古河道、古湖泊和古三角洲、古潮流沙脊是东海西部陆架区发育最为广泛的灾害地质体,海底火山、岩浆底辟主要分布在东部琉球岛弧附近,海底滑坡、海底峡谷等通常发生在东海陆坡或岛坡附近。

(2)活动断层、地震、海底火山等都是构造成因的灾害地质体;古河道、古湖泊、古三角洲、古潮流沙脊、海底峡谷等为海平面变化及水动力堆积侵蚀作用成因的灾害地质体;海底滑坡、海底扇等则为重力作用成因为主的灾害地质体。

(3)海底表面的地质灾害体(如海底火山、海底峡谷、潮流沙脊等)的稳定性对海洋工程的安全影响很大,尤其是对于海底表面的光缆、油气管道等海底管线的危害最大,对潜水艇及大型船舶的航行造成一定的障碍,容易发生事故;而海底浅层灾害体(浅断层、古河道、古湖泊、古三角洲、浅层气等)一般在海底表面之下几十米或百米之内。一方面这些特殊的地质体可能由于上覆沉积层承载能力的差异,对钻井平台桩基造成危害。另一方面浅层高压气在上覆地层压力不断增大的情况下可能自行爆发式减压,对工程造成危害,特别是高压气囊可能造成重大井喷事故。

致谢:本文在写作过程中得到了郝梓国主编的指导和帮助,并提出了建设性意见,特此致谢。感谢中国海洋大学“东方红2号”科考船和上海海洋石油局第一海洋地质调查大队“勘407轮”为相关数据获取付出的努力。

References

- Bao Caiwang, Jiang Yukun. 1993. Types and characteristics of potential subbottom geological hazards in nearshore zone of China[J]. *Tropic Oceanology*, 18(3): 25-31(in Chinese with English abstract).
- Bao Caiwang. 1995. Buried ancient channels and deltas in the Zhujiang River mouth shelf area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(2): 25-36(in Chinese with English abstract).
- Capernter G B, Mearthy J C. 1980. Hazards analysis on the Atlantic outer continental shelf[C]// 12th Annual Offshore Technology Conference Proceedings. Houston Offshore Technology Conference: 419-424.
- Chen Hongjun, Huanglei, Peng Xuechao, Wu Jiaoqi, Li Wencheng, Wang Yingming. 2012. Discussion of characteristics and formation of landslide zones in the gas hydrate survey area of northwest continental slope, the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(5): 18-25(in Chinese with English abstract).
- Chen Junren, Li Tinghuan. 1993. Types and distribution of geological hazards in the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(1): 76-85(in Chinese with English abstract).
- Chen Junren, Yang Muzhuang. 1996. Research on the potential factors for geologic hazards in South China Sea[J]. *Journal of Engineering Geology*, 4(3): 34-39(in Chinese with English abstract).
- Chen Junren. 1996. An analysis on geohazardous factors in the Zhujiang River Mouth Basin of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 15(1): 9-16(in Chinese with English abstract).
- Chen Shanshan, Chen Xiaohui, Meng Xiangjun, Li Rihui, Hou Fanghui. 2016. Features and origin of submarine bedforms in the Liaodong Bay, the Bohai Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 32(5): 31-39(in Chinese with English abstract).
- Chen Shanshan, Sun Yunbao, Wu Shiguo. 2012. Sea bottom landslide in the Shenhu area on the north margin of South China sea and triggering mechanisms[J]. *Marine Geology Frontiers*, 28(6): 40-45 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shanshan, Wang Zhongbo, Lu Kai, Qi Jianghao, Zhao Zhao, Zhang Zhixun. 2019. Sedimentary stratigraphic framework and palaeoenvironmental evolution of the northern outer shelf of East China Sea since MIS6[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(6): 124-136(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohui, Li Rihui, Zhang Zhixun, Lan Xianhong. 2012. Characteristics of the tidal sand ridges and influence factors offshore of the southeast Liaodong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 77-84(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohui, Zhang Xunhua, Li Rihui, Yang Hhuijiang. 2014. A preliminary study on hazardous geology in the bohai strait[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 11-19(in Chinese with English abstract).
- Cooper M J P, Beevers M D, Oppenheimer M. 2008. The potential impacts of sea level rise on the coastal region of New Jersey, USA[J]. *Climatic Change*, 90(4): 475-492.
- Du Jun, Li Peiying, Liu Lejun. 2004. Evaluation Study of Sea Bed Stability in the East China Sea Oil and Gas Resource Area[J]. *Advances in Marine Science*, 22(4): 480-485(in Chinese with English abstract).
- Du Jun, Li Peiying, Wei Wei, Cao Chengxiao, Liu Lejun. 2008. Stability zoning of hazard geology in coastal zone of China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 17(4): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Du Wenbo, Ye Yincan, Zhuang Zhenye. 2007. Sedimentary Environment Analysis of Ancient Sand Ridges from Zk23 Hole in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27

- (2): 11–16(in Chinese with English abstract).
- Fan Fengxin, Lin Meihua, Jiang Ronghua, Wang Chunlan. 2000. The rift block ridge in north continental shelf front slope of the East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 30(1): 178–181(in Chinese with English abstract).
- Fan Fengxin, Lin Meihua, Jiang Ronghua, Zhuang Jiecao. 1999. The submarine buried paleo-delta in the east outer continental shelf of Hainan Island[J]. *Marine Sciences*, (6): 55–58(in Chinese with English abstract).
- Fan Fengxin, Lin Meihua. 1999. Marginal gully and scarp on the outer continental shelf margin of the East China Sea[J]. *Marine Sciences*, (3): 53–56(in Chinese with English abstract).
- Fan Fengxin, Yan Jun, Chen Changan, Luan Zhendong, Zhuang Lihua. 2007. Paleo-delta deposition in the west slope of the northern Okinawa Trough[J]. *Studia Marina Sinica*, 48: 42–54(in Chinese with English abstract).
- Feng Wenke, Shi Yaohong, Chen Linghui. 1994. Research for seafloor landslide stability on the outer continental shelf and the upper continental slope in the northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 14(2): 81–94(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Liu Zonghui, Ke Shengbian. 1994. The type, character and distribution law of geological hazard in the north Nanhai Sea[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 5(S): 171–180(in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, Qiu Jiandong, Kong Xianghuai, Liu Sen, Huang Xueyong, Zhuang Haihai. 2018. The evolution of sedimentary environment since late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Geology in China*, 45(1): 59–68(in Chinese with English abstract).
- Gu Mingguang. 2009. Late Quaternary sediments and paleoenvironmental evolution on the northern bank of the Qiantang River[J]. *Geology in China*, 36(2): 378–386(in Chinese with English abstract).
- Guo Binghuo, Huang Zhenzong, Li Peiyong, Ji Weidong, Liu Guangyun, Xu Jjianping. 2004. *Marine Environment of Chinese Offshore and Adjacent*[M]. Beijing: China Ocean Press, 402–403 (in Chinese).
- Guo Junhua, Wu Shiguo, Xu Ning, Fan Fengxin. 2007. Structural characteristics of gas hydrate deposition in the west slope of the okinawa trough and its adjacent area[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 38(5): 432–437(in Chinese with English abstract).
- He Jiaxiong, Zhu Youhai, Weng Rongnan, Huang Xia, Xie Qixun, Gong Xiaofeng. 2012. Development and evolution characteristics of mud diapir and mud volcano in the northern margin basin of the South China Sea and their petroleum geological significance[J]. *Scienc*, 64(2): 15–18(in Chinese with English abstract).
- Hu Gang, Liu Jian, Zhou Liangyong, Kong Xianghuai, Liang Yuan. 2007. Geo-hazards in the offshore area of the northeastern Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(4): 29–35(in Chinese with English abstract).
- James V Gardner David B Prior, Michael E Field. 1999. Humboldt Slide – a large shear dominated retrogressive slope failure[J]. *Marine Geology*, 154(1/4): 323–338.
- Jin Xianglong. 1992. *Marine Geology of the East China Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 316–317.
- Kish S A, Donoghue J F. 2013. Coastal response to storms and sea-level rise: Santa Rosa Island[J]. *Journal of Coastal Research*, (63): 131–140.
- Lei Yuting, Li Jianghai, Wang Dianju, Yang Menglian. 2019. Controlling factors and tectonic evolution patterns of mud diapir in the Niger Delta[J]. *Special Oil Gas Reservoirs*, 26(5): 44–50(in Chinese with English abstract).
- Li Chenggang, Fan Fengxin, Yan Jun. 2007. The slipping zone in the north of the shelf break in the East China Sea[J]. *Marine Sciences*, 31(5): 90–92(in Chinese with English abstract).
- Li Fan, Yu Jianjun, Jiang Xiuheng, Yu Jjiadong. 1991. Study on the disastrous geology of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 11(4): 11–23(in Chinese with English abstract).
- Li Fan, Yu Jianjun. 1994. Classification of geohazards factors on continental shelf[J]. *Marine Sciences*, (4): 50–53(in Chinese with English abstract).
- Li Guangxue, Liu Yong, Yang Zigeng. 2009. Sea-level rise and sedimentary environment response in the East China continental shelf since the last Glacial Maximum[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 13–19(in Chinese with English abstract).
- Li Naisheng. 1988. Study on the fault structure of Okinawa Trough[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 19(4): 347–358(in Chinese with English abstract).
- Li Peiyong, Du Jun, Liu Lejun, Fu Mingzuo, Wang Wenhai. 2007. Characteristics and Evaluation of Hazard Geology in Coastal Zone of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 226–235.
- Li Xishuang, Liu Baohua, Zheng Yanpeng, Li Sanzhong, Wang Kuiyang. 2002. Types and Acoustic Reflection Characteristics of Geological Hazards in Yellow Sea and East China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 32(1): 107–114(in Chinese with English abstract).
- Li Xuejie, Wang Dawei, Wu Shiguo, Wang Weiwei, Liu Gang. 2017. Geomorphology of Sansha canyon: identification and implication[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(3): 28–36(in Chinese with English abstract).
- Li Z W. 2011. Research on Hazardous Geological Factors in the Outer Shelf of Northern South China Sea and Influence on the Submarine Pipelines[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 1–98(in Chinese with English abstract).
- Liu Congshu, Ding Weiwei, Yin Shaoru, Fang Penggao, Ding Hanghang. 2019. Geomorphology, sedimentary characteristics and

- controlling factors of submarine canyons in the northern continental slope of the South China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 37(2): 28–43(in Chinese with English abstract).
- Liu Dujuan, Hu Taojun, Huang Panyang, Ji Youjun. 2014. Classification and distribution of marine geohazards factors in Zhoushan Islands[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (3): 153–160(in Chinese with English abstract).
- Liu Dujuan, Pan Guofu, Ye Yincan. 2010. Types and acoustic reflection characteristics of geological hazard factors in the shelf of East China Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 29(6): 664–668(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng. 2010. A safety evaluation for submarine slope instability of the northern South China Sea due to gas hydrate dissociation[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 1–109(in Chinese with English abstract).
- Liu Jie, Su Ming, Qiao Shaohua, Sha Zhibin, Wu Nengyou, Yang Rui. 2016. Forming mechanism of the slope– confined submarine canyons in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(5): 940–950(in Chinese with English abstract).
- Liu Lejun. 2004. Theory Research and Practice on Eastsea Geohazard Regionalization in China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- Liu Shouquan, Liu Xiqing, Wang Shengjie, Guo Yugui. 2000. Kinds of hazardous geology and division in South China Sea[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 11(4): 39–44 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shouquan, Liu Xiqing, Wang Shengjie, Guo Yugui. 2002. Discussion on some problems in compilation of hazardous geological map (1:2000 000) of South China Sea[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(1): 17–20(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiqing. 2005. Main geological hazardous factors and influences on China coastal zone[J]. *Marine Geology Frontiers*, 21(5): 23–42(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Berné S, L'ATALANTE. 2000. Paleochannels and Paleodeltas in the continental shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 9–14(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Berne S, WangKuiYang, Marsset T, Tang YuXiang, Bourillet J F. 1998. Tidal deposition systems of China continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology*, 145(3/4): 225–253.
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing. Tidal Sands in the China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- Ma Yun, Kong Liang, Liang Qianrong, Lin Jinqing, Li Sanzhong. 2017. Characteristics of hazardous geological factors on the Dongsha continental slope in the northern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 102–109(in Chinese with English abstract).
- Ma Yun, Li Sanzhong, Liang Jinqiang, Suo Yanhui, Dai Liming, Wang Xiaofei, Zhang Bingkun. 2012. Characteristics and Mechanism of Submarine Landslide in the Qiongdongnan Basin Northern South China Sea[J]. *Journal of Jilian University(Earth Science Edition)*, 42(S3): 196–205(in Chinese with English abstract).
- Ma Yun, Li Sanzhong, Xia Zhen, Zhang Bingkun, Wang Xiaofei, Cheng Shixiu. 2014. Characteristics of Hazardous Geological Factors on Shenhu Continental Slope in the Northern South China Sea[J]. *Editorial Committee of Earth Science– Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1364–1372(in Chinese with English abstract).
- Mei Xi, Li Rihui, Zhang Xunhua, Wang Zhongbo, Zhang Yong. 2019. Reconstruction of phytoplankton productivity and community structure in the South Yellow Sea[J]. *China Geology*, 2: 315–324.
- Miao Weidong, Li Shijie, Feng Jinshun, Gao Li, E Jian. 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. *Geology in China*, 43(6): 2022–2035(in Chinese with English abstract).
- Nie Xin, Sun Meijing, Du Wenbo. 2017. Sedimentary Characteristics of the Penghu Submarine Canyon in the Northeastern of the South China Sea[J]. *Geological Review*, 63(S1): 275–276(in Chinese with English abstract).
- Ning Ze, Lin Manman, Zhang Yong, Zhang Xiaobo, Kong Xianghui. 2019. Distribution of potential geological hazards and control factors in Qingdao offshore, China[J]. *China Geology*, 1: 40–48.
- Petter B, Kjell B, Carl F, Forsberg, Anders S, Tore J, Kvalstad. 2005. Explaining the Storegga Slide[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 22(1/2): 11–19.
- Qin Yunshan, Zhao Songling, Chen Lirong, Zhao Songling. 1987. *Geology of the East China Sea*[M]. Beijing: Science Press, 71–86.
- Ranasinghe R, Duong T M, Uhlenbrook S, Roelvink D, Stive M. 2013. Climate–change impact assessment for inlet–interrupted coastlines[J]. *Nature Climate Change*, 3(1): 83–87.
- Song Ruiyou, Yu Junfeng, Han Guangming, Hao Defeng, Li Wenlong. 2017. Diapiric types and intrusion patterns in Yinggehai Basin[J]. *Global Geology*, 36(4): 1235–1243(in Chinese with English abstract).
- Sun Jie, Zhan Wenhuan, Jia Jianye, Qiu Xuelin. 2010. Hazardous geology and its relationship with environmental evolution in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(1): 104–110(in Chinese with English abstract).
- Sun Yunbao, Wu Shiguo, Wang Zhijun, Li Qingping, Wang Xiujuan, Dong Dongdong, Liu Feng. 2008. The geometry and deformation characteristics of Baiyun submarine landslide[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(6): 69–77(in Chinese with English abstract).
- Tian Jie, Song Jun, Ma Benjun, Wu Shiguo, Lü Fuliang. 2020. The Segmentation Features of Geomorphology and Sedimentary Structure of the Zhongjian Canyon[J]. *Earth Science*, 1–17(in

- Chinese with English abstract).
- Wang Lei, Wu Shiguo, Li Qingping, Wang Dawei. 2016. Submarine slides and influencing factors in the continental shelf break area of the Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Sciences*, 40(5): 131–141 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiyao, Qian Maolu, Su Junqing, Liu Zhiying, Wang Yu, Tang Ge. 2016. Genesis of mud diapir and its impact on hydrocarbon reservoiring: A case study of diapir penetration in Niger Termit Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 23(1): 39–45(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Li Rihui, Yang Shouye, Bai Fenglong, Mei Xi, Zhang Jian, Lu Kai. 2019. Comparison of detrital mineral compositions between stream sediments of the Yantze River (Changjiang) and the Yellow River (Huanghe) and their provenance implication[J]. *China Geology*, (2): 169–178.
- Willian R B. 1986. *Structue of the Continental Shelf and Slope Geohazardous and Engineering Constracts*[D]. Texas: A & M University.
- Wu Shiguo, Chen Shanshan, Wang Zhijun, Li Qingping. 2008. Submarine landslide and risk evaluation on its instability in the deepwater continental margin[J]. *Geoscience*, 22(3): 430–437(in Chinese with English abstract).
- Wu Ziyin, Gin Xianglong, Li Jiabiao, Zheng Yulong. 2006. Linear sand ridges of the outer shelf of the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(1): 93–103(in Chinese with English abstract).
- Xia Dongxing, Liu Zhenxia. 2001. Tracing the Changjiang River's flowing route entering the sea during the last ice age maximum[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(5): 87–94(in Chinese with English abstract).
- Xia Zhen, Zheng Tao, Pang Gaocun. 1999. Features of submarine geological hazards in northern South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 18(4): 91–95(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei. 2006. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(1): 7–14(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenda, Zhang Yibiao, Li Bin. 2011. Types and characteristics of deepwater geologic hazard in Qiongdongnan of the South China Sea[J]. *Offshore Oil*, 31(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenda. 2002. Structure and sedimentary environment for submarine dune ridges in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 9–14(in Chinese with English abstract).
- Ye Yincan, Chen Junren, Pan Guofu, Liu Kui. 2003. A study of formation cause, existing characteristics of the shallow gas and its danger to engineering[J]. *Donghai Marine Science*, 21(1): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- Ye Yincan. 2012. *Marine Hazard Geology*[M]. Beijing: Science Press, 1–22.
- Yi Shantang, Hu Xiaosan, Luo Zongjie, Luo Weidong. 2020. Geomorphological characteristics and controlling factors of the Yitong canyon group on the northern slope of the South China sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 36(4): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Yin Shaoru, Wang Liaoliang, Guo Yiqun, Zhong Guangfa. 2015. Morphology, sedimentary characteristics, and origin of the Dongsha submarine canyon in the northeastern continental slope of the South China Sea[J]. *Science China: Earth Science*, 45(3): 275–289 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongming, Shi Xiaowei, Lü Zhiwei, Bi Jianqiang. 2017. Study on hazardous geology in Qingdao offshore[J]. *Marine Science Bulletin*, 36(4): 385–393(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhizhong, Gu Zhaofeng, Liu Xiqing, Zhang Zhixun. 2007. Hazardous Geology and marine geological environmental evolution in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(5): 15–22(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinhai. 2004. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea [J]. *Offshore Oil*, 24(4): 6–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chuan, Fan Fengxin, Ruan Zhendong, Ma Xiaochuan, Yan Jun. 2013. Geomorphology and hazardous geological factors on the continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 29(1): 51–60(in Chinese with English abstract).
- Zhou Liangyong, Liu Jian, Liu Xiqing, Li Guangxue, Chen Zhengxin. 2004. Coastal and marine geo hazards in the modern yellow river delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(3): 19–27(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yousheng. 2017. Features and distribution pattern of the geological hazards in the northern continental shelf margins of South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 29(3): 107–115 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍才旺, 姜玉坤. 1993. 中国近海海底潜在地质灾害类型及其特征[J]. *热带海洋*, 18(3): 24–31.
- 鲍才旺. 1995. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 15(2): 25–36.
- 陈泓君, 黄磊, 彭学超, 吴蛟岐, 李文成, 王英民. 2012. 南海西北陆坡天然气水合物调查区滑坡带特征及成因探讨[J]. *热带海洋学报*, 31(5): 18–25.
- 陈俊仁, 李廷桓. 1993. 南海地质灾害类型与分布规律[J]. *地质学报*, 67(1): 76–85.
- 陈俊仁, 杨木壮. 1996. 南海潜在地质灾害因素研究[J]. *工程地质学报*, 4(3): 34–39.
- 陈俊仁. 1996. 南海珠江口盆地地质灾害因素分析[J]. *热带海洋*, 15(1): 9–16.
- 陈珊珊, 陈晓辉, 孟祥君, 李日辉, 侯方辉. 2016. 渤海辽东湾海域海底地形特征及控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 32(5): 31–39.

- 陈珊珊, 孙运宝, 吴时国. 2012. 南海北部神狐海域海底滑坡在地质剖面上的识别及形成机制[J]. 海洋地质前沿, 28(6): 40-45.
- 陈珊珊, 王中波, 陆凯, 祁江豪, 赵钊, 张志珣. 2019. 东海北部外陆架 MIS6 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, 39(6): 124-136.
- 陈晓辉, 李日辉, 张志珣, 蓝先洪. 2012. 辽东半岛南岸海域潮流沙脊特征及影响因素探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 32(5): 77-84.
- 陈晓辉, 张训华, 李日辉, 杨慧良. 2014. 渤海海峡海域灾害地质研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 34(1): 11-19.
- 杜军, 李培英, 刘乐军. 2004. 东海油气资源区海底稳定性评价研究[J]. 海洋科学进展, 22(4): 480-485.
- 杜军, 李培英, 魏巍, 曹成效, 刘乐军. 2008. 中国海岸带灾害地质稳定性区划[J]. 自然灾害学报, 17(4): 1-6.
- 杜文博, 叶银灿, 庄振业. 2007. 东海 Zk23 孔的古沙脊沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(2): 11-16.
- 范奉鑫, 林美华, 江荣华, 王春兰. 2000. 东海陆架前缘斜坡(冲绳海槽西坡)北部的断块隆脊地貌[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 30(1): 178-181.
- 范奉鑫, 林美华, 江荣华, 庄杰. 1999. 海南岛东部外陆架水下埋藏古三角洲[J]. 海洋科学, (6): 55-58.
- 范奉鑫, 林美华. 1999. 东海北部陆架外缘的边缘沟、坎[J]. 海洋科学, (3): 53-56.
- 范奉鑫, 阎军, 陈长安, 栾振东, 庄丽华. 2007. 冲绳海槽北部西坡的古三角洲沉积[J]. 海洋科学集刊, 48: 42-54.
- 冯文科, 石要红, 陈玲辉. 1994. 南海北部外陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 14(2): 81-94.
- 冯志强, 刘宗惠, 柯胜边. 1994. 南海北部地质灾害类型及分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 5(S): 171-180.
- 高茂生, 郭飞, 侯国华, 仇建东, 孔祥准, 刘森, 黄学勇, 庄海海. 2018. 渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J]. 中国地质, 45(1): 59-68.
- 顾明光. 2009. 钱塘江北岸晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 中国地质, 36(2): 378-386.
- 郭炳火, 黄振宗, 李培英, 暨卫东, 刘广远, 许建平. 2004. 中国近海及邻近海域海洋环境[M]. 北京: 海洋出版社, 402-403.
- 郭军华, 吴时国, 徐宁, 范奉鑫. 2007. 冲绳海槽西侧陆坡及其邻区天然气水合物成藏构造特征[J]. 海洋与湖沼, 38(5): 432-437.
- 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 黄霞, 谢奇勋, 龚晓峰. 2012. 南海北部边缘盆地泥底辟、泥火山特征及油气地质意义[J]. 科学, 64(2): 15-18.
- 胡刚, 刘健, 周良勇, 孔祥准, 梁源. 2007. 山东半岛东北部滨浅海地区灾害地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(4): 29-35.
- 金翔龙. 1992. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 316-317.
- 雷雨婷, 李江海, 王殿举, 杨梦莲. 2019. 尼日尔三角洲泥底辟形成控制因素及构造演化模式[J]. 特种油气藏, 26(5): 44-50.
- 李成钢, 范奉鑫, 阎军. 2007. 东海陆架前缘斜坡北部的滑塌带[J]. 海洋科学, 31(5): 90-92.
- 李凡, 于建军, 姜秀培, 余家栋. 1991. 南黄海灾害性地质研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 11(4): 11-23.
- 李凡, 于建军. 1994. 陆架海灾害地质因素分类[J]. 海洋科学, (4): 50-53.
- 李广雪, 刘勇, 杨子庚. 2009. 中国东部陆架沉积环境对末次冰盛期以来海面阶段性上升的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 13-19.
- 李乃胜. 1988. 冲绳海槽断裂构造的研究[J]. 海洋与湖沼, 19(4): 347-358.
- 李培英, 杜军, 刘乐军, 傅命佐, 王文海. 2007. 中国海岸带灾害地质特征及评价[M]. 北京: 海洋出版社, 226-235.
- 李西双, 刘保华, 郑彦鹏, 李三忠, 王揆洋. 2002. 黄东海灾害地质类型及声学反射特征[J]. 青岛海洋大学学报, 32(1): 107-114.
- 李学杰, 王大伟, 吴时国, 王微微, 刘刚. 2017. 三沙海底峡谷识别与地貌特征分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(3): 28-36.
- 李泽文. 2011. 南海北部外陆架灾害地质因素及其对海底管道的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 1-98.
- 刘丛舒, 丁巍伟, 殷绍如, 方鹏高, 丁航航. 2019. 南海北部陆坡区海底峡谷地貌、沉积特征及控制因素[J]. 海洋学研究, 37(2): 28-43.
- 刘杜娟, 胡涛骏, 黄潘阳, 季有俊. 2014. 舟山海域海洋灾害地质因素分类及其分布规律[J]. 海洋湖沼通报, (3): 153-160.
- 刘杜娟, 潘国富, 叶银灿. 2010. 东海陆架典型海洋灾害地质因素及其声学反射特征[J]. 海洋通报, 29(6): 664-668.
- 刘峰. 2010. 南海北部陆坡天然气水合物分解引起的海底滑坡与环境风险评价[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 1-109.
- 刘杰, 苏明, 乔少华, 沙志彬, 吴能友, 杨睿. 2016. 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨[J]. 沉积学报, 34(5): 940-950.
- 刘乐军. 2004. 东海灾害地质分区研究的理论与实践[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文.
- 刘守全, 刘锡清, 王圣洁, 郭玉贵. 2000. 南海灾害地质类型及分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 11(4): 39-44.
- 刘守全, 刘锡清, 王圣洁, 郭玉贵. 2002. 编制 1:200 万南海灾害地质图的若干问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(1): 17-20.
- 刘锡清, 刘守全, 王圣洁, 郭玉贵. 2002. 南海灾害地质发育规律初探[J]. 中国地质灾害与防治报, 13(1): 12-16.
- 刘锡清. 2005. 我国海岸带主要灾害地质因素及其影响[J]. 海洋地质动态, 21(5): 23-42.
- 刘振夏, Berné S, L'Atalante 科学考察组. 2000. 东海陆架的古河道和古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 20(1): 9-14.
- 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.
- 马云, 孔亮, 梁前勇, 林进清, 李三忠. 2017. 南海北部东沙陆坡主要灾害地质因素特征[J]. 地学前缘, 24(4): 102-109.
- 马云, 李三忠, 梁金强, 索艳慧, 戴黎明, 王霄飞, 张丙坤. 2012. 南海北部琼东南盆地海底滑坡特征及其成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学), 42(S3): 196-205.
- 马云, 李三忠, 夏真, 张丙坤, 王霄飞, 程世秀. 2014. 南海北部神狐陆坡区灾害地质因素特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 39(9): 1364-1372.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 高立, 鄂建. 2016. 长江三角洲 NB5 孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022-2035.

- 聂鑫, 孙美静, 杜文波. 2017. 南海东北部澎湖海底峡谷群沉积特征[J]. 地质论评, 63(S1): 275-276.
- 秦蕴珊, 赵松龄, 陈丽蓉, 赵松龄. 1987. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 71-86.
- 宋瑞有, 于俊峰, 韩光明, 郝德峰, 李文龙. 2017. 莺歌海盆地底辟类型及侵入方式[J]. 世界地质, 36(4): 1235-1243.
- 孙杰, 詹文欢, 贾建业, 丘学林. 2010. 珠江口海域灾害地质因素及其与环境变化的关系[J]. 热带海洋学报, 29(1): 104-110.
- 孙运宝, 吴时国, 王志君, 李清平, 王秀娟, 董冬冬, 刘峰. 2008. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 28(6): 69-77.
- 田洁, 宋军, 马本俊, 吴时国, 吕福亮. 2020. 中建海底峡谷地貌及沉积特征的分段性[J]. 地球科学, 1-17.
- 王磊, 吴时国, 李清平, 王大伟. 2016. 珠江口盆地陆架坡折带海底滑坡及其影响因素[J]. 海洋科学, 40(5): 131-141.
- 王芝尧, 钱茂路, 苏俊青, 刘志英, 王瑀, 汤戈. 2016. 泥岩底辟成因及对油气成藏的影响——以尼日尔 Termit 盆地底辟区为例[J]. 油气地质与采收率, 23(1): 39-45.
- 吴时国, 陈珊珊, 王志君, 李清平. 2008. 大陆边缘深水区海底滑坡及其不稳定性风险评估[J]. 现代地质, 22(3): 430-437.
- 吴自银, 金翔龙, 李家彪, 郑玉龙. 2006. 东海外陆架线状沙脊群[J]. 科学通报, 51(1): 93-103.
- 夏东兴, 刘振夏. 2001. 末次冰期盛期长江入海流路探讨[J]. 海洋学报, 23(5): 87-94.
- 夏真, 郑涛, 庞高存. 1999. 南海北部海底地质灾害因素[J]. 热带海洋, 18(4): 91-95.
- 徐锡伟. 2006. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题[J]. 震灾防御技术, 1(1): 7-14.
- 杨文达, 张异彪, 李斌. 2011. 南海琼东南深水海区地质灾害类型与特征[J]. 海洋石油, 31(1): 1-7.
- 杨文达. 2002. 东海海底沙脊的结构及沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 22(1): 9-14.
- 叶银灿, 陈俊仁, 潘国富, 刘奎. 2003. 海底浅层气的成因、赋存特征及其对工程的危害[J]. 东海海洋, 21(1): 27-36.
- 叶银灿. 2012. 中国海洋灾害地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 1-22.
- 伊善堂, 胡小三, 罗宗杰, 罗伟东. 2020. 南海北部陆坡—统峡谷群地貌特征及控制因素分析[J]. 海洋地质前沿, 36(4): 18-26.
- 殷绍如, 王嘹亮, 郭依群, 钟广法. 2015. 东沙海底峡谷的地貌沉积特征及成因[J]. 中国科学:地球科学, 45(3): 275-289.
- 张永明, 石晓伟, 吕志伟, 毕建强. 2017. 青岛近海灾害地质研究[J]. 海洋通报, 36(4): 385-393.
- 张志忠, 顾兆峰, 刘锡清, 张志珣. 2007. 南黄海灾害地质及地质环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(5): 15-22.
- 赵金海. 2004. 东海中、新生代盆地成因机制和演化[J]. 海洋石油, 24(4): 6-14.
- 周川, 范奉鑫, 栾振东, 马小川, 阎军. 2013. 南海北部陆架主要地貌特征及灾害地质因素[J]. 海洋地质前沿, 29(1): 51-60.
- 周良勇, 刘健, 刘锡清, 李广雪, 陈正新. 2004. 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, 24(3): 19-27.
- 朱友生. 2017. 南海北部陆架边缘区域地质灾害类型特征及分布规律[J]. 中国海上油气, 29(3): 107-115.