

doi: 10.12029/gc20180102

何健, 梁前勇, 马云, 石要红, 夏真. 2018. 南海北部陆坡天然气水合物区地质灾害类型及其分布特征[J]. 中国地质, 45(1): 15–28.

He Jian, Liang Qianrong, Ma Yun, Shi Yaohong, Xiao Zhen. 2018. Geohazards types and their distribution characteristics in the natural gas hydrate area on the northern slope of the South China Sea[J]. Geology in China, 45(1): 15–28(in Chinese with English abstract).

南海北部陆坡天然气水合物区地质灾害类型 及其分布特征

何健^{1,2} 梁前勇^{1,2} 马云³ 石要红^{1,2} 夏真^{1,2}

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510760;
3. 长江师范学院土木建筑工程学院, 重庆 涪陵 408100)

摘要:南海北部陆坡区存在着有利天然气水合物的成藏条件,综合调查及钻探结果揭示南海北部陆坡区蕴藏着丰富的天然气水合物资源,天然气水合物多发育在构造活动复杂地区,同时也是灾害地质因素高发区,潜在的灾害地质因素对水合物的赋存及商业开发是极大的威胁。本文基于广州海洋地质调查局多年来在南海北部天然气水合物发育区采集的大量 2D、3D、浅地层剖面及多波束测深资料对南海北部水合物发育区进行海底灾害地质研究,对研究区地形地貌特征、灾害地质因素类型、特征、成因及分布特征进行了综合分析,同时阐述了灾害地质因素与水合物的形成与分解之间的关系,研究结果对南海北部陆坡区天然气水合物区成矿预测、试采井布置及未来灾害风险评价提供了基础数据和决策依据。

关键词:南海北部陆坡;天然气水合物;灾害地质;海底滑坡

中图分类号:P744.4;P738 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)01-0015-14

Geohazards types and their distribution characteristics in the natural gas hydrate area on the northern slope of the South China Sea

HE Jian^{1,2}, LIANG Qianrong^{1,2}, MA Yun³, SHI Yaohong^{1,2}, XIAO Zhen^{1,2}

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, Guangdong, China; 2. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China; 3. Civil and Architectural School of Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: Integrated investigation has revealed that the northern slope of the South China Sea (SCS) is a favorable place for gas hydrate accumulation and hence has stored a large amount of hydrate resources. Natural gas hydrates are mostly developed in areas of complex tectonic activity which are also areas of high-risk geological disasters. Potential hazard geological factors constitute great threats to the storage and commercial exploitation of gas hydrate. Based on a large number of 2D, 3D seismic profiles and

收稿日期:2018-01-24;改回日期:2018-02-05

基金项目:中国地质调查局项目“南海天然气水合物环境效应评价”(DD20160217)资助。

作者简介:何健,男,1987年生,硕士,工程师,主要从事南海天然气水合物环境效应调查评价工作;E-mail:oilgeo@qq.com。

通讯作者:马云,女,1986年生,讲师,主要从事天然气水合物相关地质灾害调查研究工作;E-mail:honeyu0539@126.com。

multi-beam data acquired by the Guangzhou Marine Geological Survey over the years in the gas hydrate development zone in the northern part of the South China Sea, the authors conducted the seabed disaster geological study on the northern slope of the South China Sea. In this paper, the geomorphological features, the types, characteristics, genesis and distribution characteristics of the geohazards related to gas hydrate in the study area were comprehensively analyzed. The relationship between the geohazards and hydrate formation and decomposition was also discussed. The results of the study were used to predict the mineralization of gas hydrates on the northern slope of the South China Sea, thus providing a data basis for future disaster risk assessment and decision-making.

Key words: northern slope of SCS; gas hydrate; geohazards; submarine landslides

About the first author: HE Jian, male, born in 1987, master, majors in mineral survey and exploration; E-mail: oilgeo@qq.com.

About the Corresponding author: MA Yun, female, born in 1986, doctor, E-mail: honeysucle0539@126.com

Fund support: Supported by "Investigation and Evaluation of Environmental Effect of Gas Hydrate in the South China Sea" Program of China Geological Survey (No. DD20160217).

1 引 言

南海北部陆坡区蕴藏着丰富的天然气水合物资源,由于天然气水合物多发育在构造复杂地区(王宏斌,2008),构造复杂地区同时也是孕灾的重要地质背景。天然气水合物分解引发的灾害非常巨大,如可能导致海底大规模滑坡事件发生,摧毁光缆和海上工程设施,引发海啸等,同时释放的巨量甲烷会导致剧烈的气候变化,引发大洋缺氧(Hesselbo et al., 2000)和全球变暖等灾难性后果。因此对天然气水合物赋存区进行灾害地质分析非常重要。

国际上针对海底灾害地质研究做了许多工作,尤其针对与水合物相关的海底滑坡研究取得了许多成果,主要包括利用地球物理、地质、数值模拟及室内水槽实验的方法针对海底滑坡发生时间、规模、频率期次以及演化机制等进行了研究。Taylor (1999)利用地震数据详细分析了布莱克海台底辟区与水合物相关的甲烷圈闭及泄露问题,发现气体被圈闭在底辟之上及稳定域底之下,气体通过断层向上运移。Milkove(2002)根据控制气体运移的因素提出了断层构造型、泥火山型、地层控制型,构造地层型4种水合物成藏模型。Hanumantha (2002)对印度西部陆架边缘滑坡的原因进行了研究,认为水合物分解、高沉积速率和地震是该区滑坡的触发因素。Timo Zander(2017)对黑海 Danube 深海扇中水合物斜坡模拟研究认为斜坡失稳的主要驱动因素是自然因素,如地震而非开发过程本身,水合物开发本身不会对斜坡稳定安全系数产生影响。Smith在

对挪威西北部全新世 Storegga 滑坡区海平面变化研究后认为,全新世早期海平面上升使陆架承受水体负载加大,产生的沉积物超压及同时伴随的地震活动是驱动 Storegga 滑坡的主要因素。目前在南海北部的灾害地质研究工作已积累了一些成果,主要对南海北部大陆架及上陆坡区主要灾害地质因素进行了识别、分类及危害分析(陆成斌等,1991;寇养琦等,1994;陈俊仁等,1996;冯志强等,1996;沙志彬等,2005;孙杰等,2010;王力峰等,2010;陈鸿君等,2012;王宵飞等,2014)。王海荣等(2008)对南海北部陆坡地貌形态进行了研究,认为研究区地貌形态演变受构造、物源供给、地震及海流影响,陈江欣等(2015)对南海台西南盆地和中建南盆地北部区域的麻坑与泥火山进行了研究,根据麻坑的平面形态、规模和组合形式对麻坑特征进行了描述和分类研究。吴时国等(2010)对南海北部东沙陆坡深水区浅水流进行了研究,利用地震反射波振幅特征、反演横波速度等属性,对浅水流地球物理特征进行研究。马云等(2014,2017)利用二维地震资料对南海北部东沙和神狐陆坡深水区开展了地质灾害特征研究,对灾害地质因素地震反射特征及成因分类进行了分析。然而对于南海北部水合物赋存区发育的各类地质灾害因素特征、成因、空间分布范围缺乏全面分析。本文基于广州海洋地质调查局多年来在南海北部天然气水合物发育区采集并处理的大量二维、三维地震资料、浅地层剖面及多波束测深资料,对南海北部水合物发育区海底灾害地质因素进行分析,对研究区地形地貌特征、灾害地质因素类型、特征、成因及分布范围进行了综合

研究,同时阐述了区内灾害地质因素与水合物生成及分解之间的关系,为理解该区水合物成矿预测、天然气水合物试采提供基础资料和决策依据。

2 区域地质背景

研究区位于南海东北部,构造上位于南海北部大陆边缘,属于被动大陆边缘性质(图1),在中生代中晚期有强烈的岩浆活动,具有活动大陆边缘的特征(龚再升等,2004)。古近纪演变为伸展的裂陷边缘,构造及充填样式以半地堑及其相间的隆起带为特征(张光学等,2003),一定程度上仍延续了活动边缘岩浆活动的特征(邹和平等,1995)。新近纪晚期以来形成海相地层构成的披盖式拗陷,受东沙运动影响,导致南海

北部大陆边缘产生了密集的近东西向张性断裂以及北西向等间距分布的张剪性断裂。根据高分辨率多波束测深资料,研究区水深范围为200~3700 m,一级地貌类型属于大陆坡,陆坡基本平行于岸线方向延伸,呈SW-NE向,从西往东,水深从200 m逐渐增加到3400 m左右,地形崎岖不平,起伏很大,向东南方向呈阶梯状下降。在垂直于陆坡延伸方向,往北西向水深逐渐变浅,过渡为大陆架,往南东向水深逐步加深,与深海平原相接。

3 海底灾害地质因素类型

3.1 划分原则

本文针对研究区为陆坡深水区地貌类型复杂

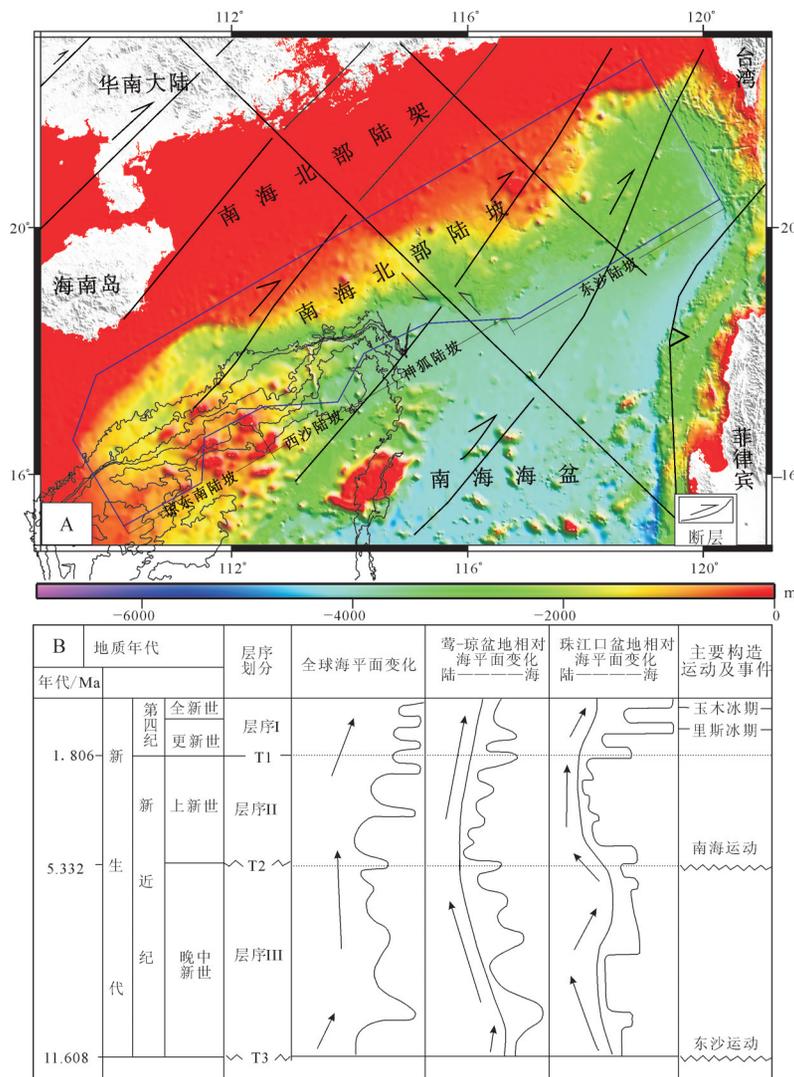


图1 南海北部陆坡水合物成矿区地形地貌及层序格架图(据于兴河等,2014;惠格格等,2016,修改)
Fig.1 Geographical location and tectonic settings of the study area (modified after Yu et al., 2014; ,Huiet al., 2016)

多变的特点,为天然气水合物矿藏的保存和勘探开发服务的目的,遵循分类方案简明实用原则(Capenter et al. 1980,冯志强等,1996),突出灾害因素对天然气水合物矿藏的直接或间接破坏作用,同时兼顾灾害因素对工程开发的潜在影响,按照灾害因素的动力来源将研究区划分为构造应力、重力、水动力、气动力,其他地质灾害类型5大类,再根据灾害地质因素具体成因分为17小类(表1)。

3.2 构造应力地质灾害类型

3.2.1 活动断裂

南海北部陆坡区主要继承了燕山期基底的断裂构造格局,第四纪以来新生的断层主要发育盖层当中。研究区活动断裂大部分是晚渐新世以前的原有断裂的复活;另一部分是晚渐新世南海陆缘扩张强烈活动时期形成的新生断裂。地震剖面上断层识别特征表现为连续性好的反射波组发生系统的错移,或两盘地层厚度不等,或一侧反射层终止或减薄,两侧反射特征不一致,具备这些特征均是断层存在的标志。活动断裂是活动构造的表现形式之一,在研究区发育十分密集。南海北部陆缘活动

断裂主体为正断层,剖面上深部断距大而浅部断距较小。从断裂组合的走向上来看,可以将南海北部陆缘的断裂分为NEE-EW、NE、NW向3组。NE向断裂大多沿东南沿海分布,其中NE向主干断裂从华南陆块延伸进入南海北部,控制了大量箕状断陷的NEE向陆倾断裂组。从地貌图上可以看出NE向断裂控制了本区陆坡整体走向和地形地貌的发育。它是在太平洋板块的俯冲碰撞下所形成的一系列断裂构造,晚渐新世即南海第一次海底扩张结束以来,NE向断裂的性质转化为张扭性(图2), N_2-Q_3 的玄武岩明显受NE向断裂控制,可见上新世—第四纪期间NE向断裂依然具有活动性。后期,NE向断裂被NW-NWW向断裂切割而分段,连续性变差。

3.2.2 地震

南海北部陆缘地震活动主要分布于内陆架区和坡折带—上陆坡区,在时间上具有周期性,活跃期与平静期交替出现,可分为滨海、琼雷、东沙—海南三大地震带,各地震带又存在着数个潜在震源区(表2)。震源深度一般 $<33\text{ km}$,均属浅震,呈带状分布,研究区域内震中排列呈北东至北东东向,该带地震频度较弱,但强度较大,大部分为浅震。南海海域约1/3的地震发生于此。强震活动与太平洋板块俯冲及海盆断陷等共同作用在陆缘引起的断块差异运动有关。研究区的构造应力场近于水平,震源错动方式以水平剪切错动为主。地震活动总的特征是东强西弱、北强南弱,地震活动分布很不均匀。震源在南海北部陆缘的东北部分布较为密集,而密集区附近普遍发育海底滑坡,这两者之间存在密切关系。东北部震源呈线性分布,走向为北

表1 水合物成矿区地质灾害类型划分方案

Table 1 Geohazards division scheme of the study area	
动力来源	灾害类型
构造应力	活动断裂、地震、火山、岩浆底辟
重力	海底滑坡、滑塌三角洲、陡坎
水动力	峡谷、侵蚀沟、浅槽、等深流、埋藏河道、埋藏三角洲
气动力	浅层气、气底辟(气烟囱)
其他	不规则基岩面

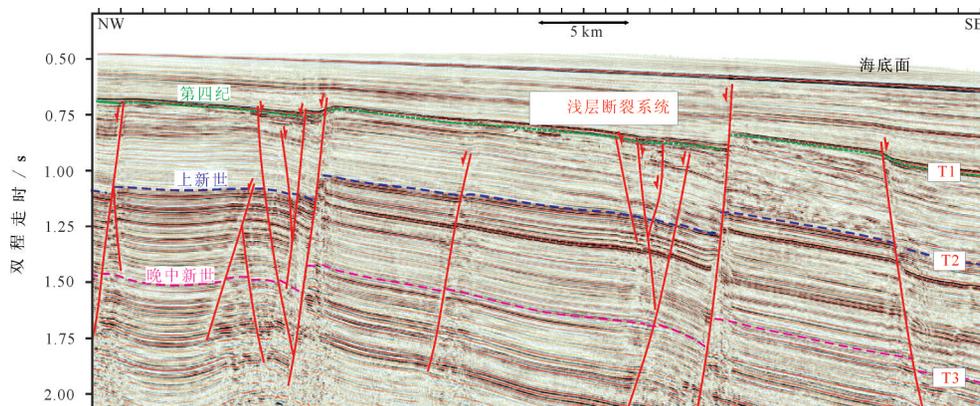


图2 研究区典型活动断裂地震反射特征

Fig.2 Typical Seismic reflection characteristics of active faults on the northern continental slope of the SCS

表2 南海北部陆缘潜在震源分布区划(据钟建强)

Table 2 Potential seismic source regionalization on northern continental slope of the SCS (after Zhong)

地震带	潜在震源区	极震区	相关主要断裂构造	百年内最大震级	长轴方向
滨海	南澎	116°55' ~117°40' E 22°50' ~23°35' N	滨海、南澳、黄冈河、牛田洋	6.8~7	EN-NEE
	红海湾口	114°50' ~115°25' E 22°10' ~22°40' N	滨海、海丰、陆丰、北卫滩	5.5~5.8	NE-NEE
	珠江口	113°30' ~114°30' E 21°40' ~22°20' N	滨海、海丰、甚至、珠江口、担杆岛东	6.5~6.8	NEE 或 NW
	川山群南	112°20' ~113°20' E 21°00' ~21°40' N	滨海、珠盆北缘、海陵岛东、广州湾	5.5~5.8	E-W
	电白沿海	110°40' ~111°40' E 21°00' ~21°40' N	滨海、阳江、吴川、神狐、广州湾	6.2~6.5	NW
琼雷	琼北	109°00' ~111°00' E 19°40' ~20°10' N	定安与 NE、NW 向次级断裂	6.8~7	E-W
	雷州半岛	109°50' ~111°35' E 20°10' ~21°10' N	滨海、吴川	6.5~6.8	NE
东沙 海南	台湾浅滩	110°40' ~111°40' E 21°40' ~22°40' N	陆坡北缘、东沙南、黄冈河、牛田洋	6.5~6.8	NE
	卫滩	115°30' ~116°30' E 20°40' ~21°20' N	陆坡北缘、珠盆南缘、北卫滩	5.5~5.8	NEE
	东沙南	116°30' ~117°30' E 20°00' ~20°40' N	陆坡北缘、海盆北缘、东沙南	5.5~5.8	NE-NEE
	神狐	112°20' ~113°20' E 19°20' ~20°10' N	陆坡北缘、神狐、广州湾	6.2~6.5	NEE
	琼东南海域	110°00' ~111°10' E 18°00' ~19°00' N	琼东南、琼海、陆坡北缘	5.5~5.8	NE

东向,向西南方地震活动逐渐减弱,这与菲律宾板块和欧亚板块的碰撞对南海北部西南端的影响较小有关;一直到琼东南和北部湾盆地地震活动又开始趋于频繁,可能与印度板块和欧亚板块的碰撞相关,其震源转化为NW向的线性分布。从华南大陆到南海北部,在NE向断裂与NW向断裂交汇处(图1),是地震应力集中的部位,在震源呈现出丛集分布的特点。

3.2.3 岩浆底辟和火山

上新世至晚更新世时期,研究区构造活动强烈,产生大规模张性断裂,沿张性断裂有大量的岩浆活动,发育成片的岩浆底辟区。冲断海底地层的岩浆作用会形成火山,而侵入在地层之内的岩浆体则形成岩浆底辟。研究区火山在二维地震剖面表现为出露海底的锥状或平顶锥状突起,向上刺穿上覆地层直至海底,火山体轮廓清晰(图3),边界呈极强振幅反射,火山体内部地震反射较弱-模糊,甚至出现空白反射,其中心一般为火山岩浆通道。

在高分辨率二维地震剖面上,岩浆底辟反射特

征较为典型,与周围地层反射特征明显不同,容易区分。通常来说研究区岩浆底辟按分布规模来讲,可以分为点状底辟和片状底辟。点状底辟在剖面上有明显的底辟通道向上切穿周围地层,内部地震振幅较弱,常常为空白反射,而底辟顶端振幅突然变强,为强振幅不连续低频反射,点状底辟的剖面形态表现为点状、朵状或饼状。片状底辟发育范围常较大,其地震反射形态表现为根部硕大,向上逐渐减小,内部反射杂乱,与围岩振幅差异显著,顶部振幅最强。

上新世直到全新世时期,南海北部陆缘产生大规模张性断裂,这些NEE向以及NW向断裂活动直接控制了火山岩的分布,陆坡断阶带的火山活动受断阶和断堑构造控制,其中NW向活动断裂起着至关重要的作用。火山作为一种构造应力灾害类型,它自身的喷发很容易对各种工程建设及能源开发造成危害,而它形成后导致的海底滑坡、断裂活动、陡坎及水合物矿藏破坏等一系列地质灾害也是影响巨大的。研究区大量火山成群出现,其周边并存

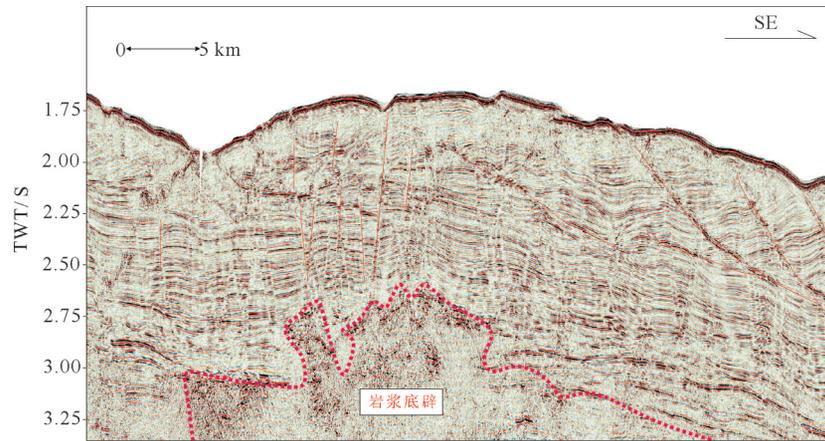


图3 研究区典型岩浆底辟的地震反射特征

Fig.3 Seismic features of typical magma diaper in the study area

一系列的海底滑坡带,这对未来工程建设必然造成不利影响,务必引起密切关注。

3.2.4 陡坎

研究区陡坎在多条地震剖面上均有明显反映,且陡坎数量相当多,本文将这些陡坎依据其成因大致分为四类:岩浆陡坎、滑坡陡坎、断裂陡坎和侵蚀陡坎。岩浆陡坎即为岩浆底辟作用或岩浆刺穿作用(火山)使得两侧地层产生明显的高差,形成陡坎地形。滑坡陡坎是由于地层失稳产生滑动产生,实际上就是滑坡陡壁。断层陡坎和侵蚀陡坎主要分布在水深200~450 m范围内,整体呈NEE向延伸,与水深线方向基本一致。滑坡陡坎则分布在滑坡体的后缘,与滑坡作用共生,其走向与侵蚀陡坎的方向相似。有些断裂陡坎迄今仍在活动,高差不断加大。陡坎在工程建设施工(管线布设、平台设置、钻孔定位等)中具有十分不利的影响,且有些陡坎还在活动,容易造成基底不稳,应当设法避开。

3.3 重力地质灾害类型

3.3.1 海底滑坡

研究区滑坡在地震剖面上可清晰显示滑动面和地层界面关系及滑动体结构。从剖面上可见明显的滑坡壁(陡崖、陡坎或陡壁)、崩塌谷(V形谷、U形谷或洼地、冲蚀谷)、滑坡体(滑动的斜坡体或鼓丘状块体)、滑动面(滑坡底界)、滑坡台阶(多级滑坡体向上微倾的表面形态)。有的滑动面呈弧形,滑坡体产状与滑动面一致,在上坡方向可见反坡向的台坎,显示了滑坡初始阶段的特征,有时多个滑动面叠合,滑坡体的地层产状与滑动面相切,地层

发生转动。本区海底滑坡的岩性主要为黏土质粉砂及黏土(陈芳,2016),这些细粒沉积通常具有高的亲水性、胀缩性和崩解性,抗剪性差。上下部岩性的明显差异成为滑动的客观条件。

3.3.2 滑塌沉积

滑塌沉积与天然气水合物的关系比较复杂,滑塌体是水合物的有利储集体,而滑塌作用又可能会破坏已存在的水合物。滑塌体是由沉积物快速堆积而成的,一般具有较高的孔隙度,而沉积物中所含的大量细粒有机碎屑为天然气水合物的形成提供了气源;同时,由于滑塌体堆积速度快,沉积物分选性差,渗透率低,不利于气体疏导,也为天然气水合物的形成提供了较好的盖层。滑塌作用也可能破坏天然气水合物稳定带的温压环境,导致水合物分解,水合物分解后使上陆坡区域沉积物进一步失稳滑塌;另外滑塌区通常也是构造活跃区,其他的构造活动(如断层或底辟)也会对水合物的成藏起到破坏作用,因此滑塌沉积也是水合物成矿区的一种地质灾害类型。

3.4 水动力地质灾害类型

3.4.1 埋藏古河道

在二维地震剖面上河道底界呈连续的波状起伏的强反射,其内部的杂乱相为辫状河道沉积;也有的底界面反射波下凹,连续,其内部反射有些杂乱,有些为弱反射,前者为粗粒充填物,后者为细粒物质充填所形成。浅层剖面上一般可见到河道底界面下凹、连续强反射特征,其内部充填物结构清晰。本区主要从地震剖面上识别出大量埋藏河道,

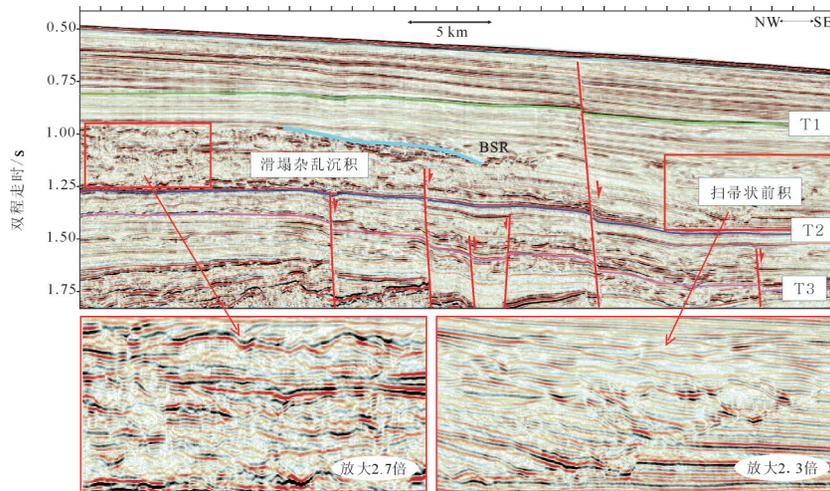


图4 滑塌沉积与BSR地震响应特征

Fig. 4 Seismic response characteristics of slump deposition and BSR

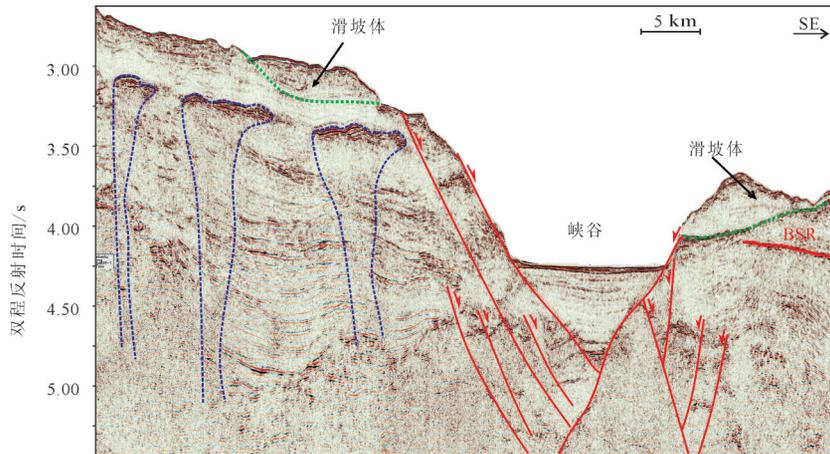


图5 海底峡谷及伴生的断层地震响应特征

Fig.5 Seismic features of submarine canyon

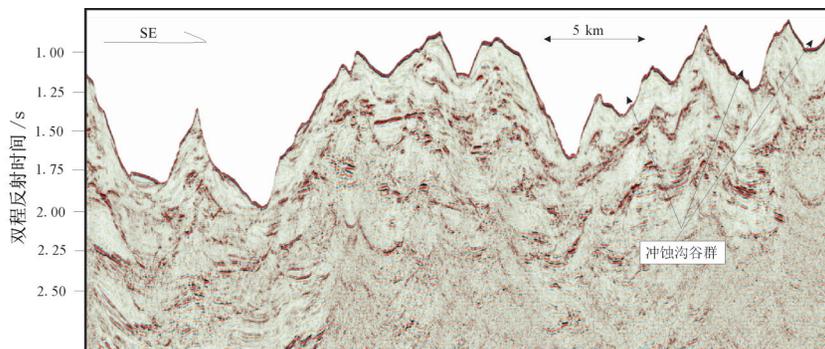


图6 水流侵蚀作用产生的冲蚀沟谷群

Fig.6 Seismic features of submarine gullies caused by underflow erosion

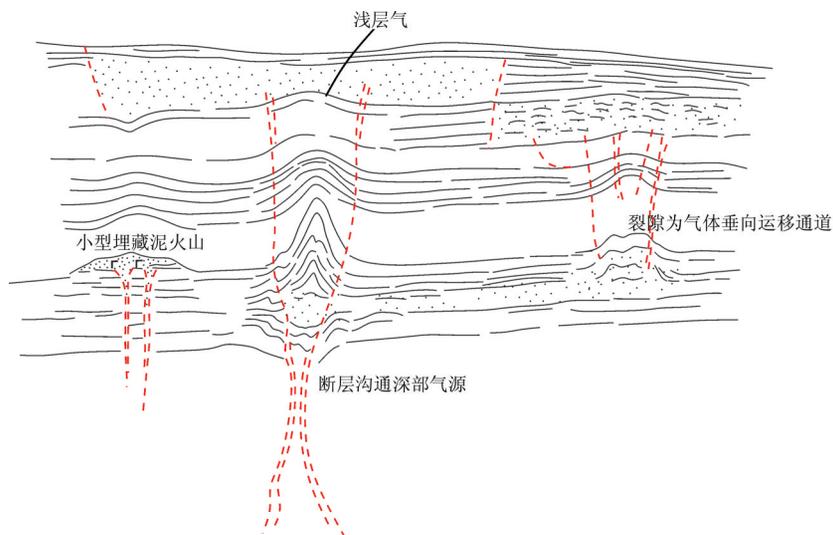


图7 气底辟形成模式图

Fig.7 Gas diapor formation pattern of the study area

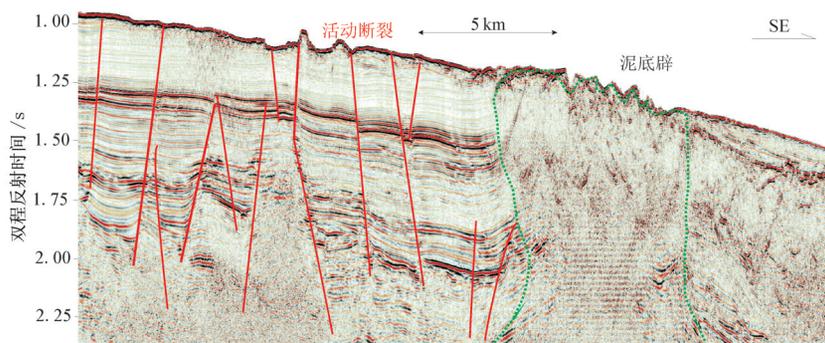


图8 活动断裂与泥底辟地震反射特征

Fig.8 Seismic response of mud diapor accompanied by shallow active faults

发育在各个层中(图9),多期河道有的自成体系,有的互相叠置长期发育,河床多次迁徙,埋藏河道的沉积与其围岩岩性有较大差异,造成承载力不均匀,对工程设施造成潜在危险,埋藏较浅,对工程建设影响更大。

3.4.2 浅槽、侵蚀沟谷

南海北部陆坡区发育了大量侵蚀沟谷、浅槽,是重要的沉积物输运通道,其形成演化记录了海平面变化、古气候、区域构造活动等信息(苏明等,2014)。海底侵蚀沟谷是水动力作用产生的海底负地形,峡谷的识别特征比较独特,地震剖面上表现出“U”、“V”型的下凹形,向下侵蚀下伏地层,地震研究区发育的峡谷常常规模很大,宽度和深度都很大,且常与滑坡、断裂、岩浆活动伴生,有时候其两侧沉积物中可见BSR存在(图5)。浅槽属于水动力

成因的灾害因素,在研究区其发育特征为宽度大,深度浅,在水合物成矿区常常因其持续的侵蚀作用,导致水合物温压条件变化而在槽底处逐渐分解,地震反射上表现为浅槽两侧BSR连续,而槽底BSR变模糊或完全消失。由于地形的起伏变化及槽底沉积与周围的岩性差异,且其水动力作用也较强,对工程建设及水合物成藏都有不利的影响,应当考虑适当的措施避免或合理施工。

侵蚀沟为一般的侵蚀作用在沉积物表面形成的沟状地形,它的规模可大可小,有多股水流作用时常常成群出现(图6)。若在水合物成矿区发育,可使沉积物分布迅速改变,对水合物的保存十分不利,持续的作用往往会使水合物矿藏分解。

3.4.3 等深流沉积

等深流是指因深水中因地球自传作用产生的

表3 地质灾害类型分布一览
Table 3 Geohazards distribution of the study area

类别	类型	琼东南	西沙	神狐	东沙
构造应力灾害因素	断裂	发育	存在	普遍	极普遍
	地震	发育	少	少	多
	火山	发育	少	存在	普遍
	岩浆底辟	多	存在	多	多
	陡坎	存在	存在	普遍	普遍
重力灾害因素	海底滑坡	普遍	存在	多	多
	滑塌三角洲	存在	少	多	少
	陡坎	存在	存在	普遍	多
水动力灾害因素	峡谷	发育	多	存在	多
	侵蚀沟群	发育	存在	存在	多
	浅槽	发育	少	发育	多
	等深流	不发育	不发育	发育	发育
	埋藏河道	存在	存在	多	存在
	埋藏三角洲	存在	少	多	少
气动力灾害因素	浅层气	普遍	不发育	多	多
	气底辟	存在	少	存在	存在
其他灾害因素	不规则基岩面	少	多	普遍	普遍

温盐环流(Heezen et al., 1966)。等深流沉积属于牵引流,常表现出牵引流沉积特征,常发育小型交错层理、水平层理和侵蚀面,常表现出平行斜坡走向波状起伏特征。等深流沉积受等深流、深水潮汐、底流和波浪的分选冲刷,物性较好,常与深水泥质沉积呈互层发育,可形成良好的生储盖组合(郭依群等, 2012)。研究区等深流沉积的发育区与水合物成矿区十分吻合,说明其形成发育对水合物具有重要的影响。另一方面,等深流又会侵蚀原有的地层,甚至可导致水合物矿藏的分解或转移,是水合物成矿区一个明显的灾害因素。

3.5 气动力地质灾害类型

3.5.1 浅层气和气底辟

浅层气是十分危险的潜在地质灾害,因这种气常具有高压性质,会造成井喷,引起火灾甚至烧毁整个平台。沉积物中含气会使地震波传播速度衰减,在地震剖面上反映为连续性较好的反射波突然中断,形成局部空白或模糊反射区(图7)。含气地层在多道地震资料处理的相对振幅保持剖面上表现为亮点显示,并出现偶极相位和极性反转特征。本区的浅层气主要是生物形成的甲烷气,常出现在古三角洲或古河道发育区;另有一些零星分布的浅层气,可能是深部油气层通过断层向浅部运移并储存形成的。

3.5.2 气底辟

研究区气底辟在地震剖面上主要表现为地震剖面同相轴连续性变差,不规则的杂乱(蠕状)反射,形态多为柱状或者锥形,在气底辟处会出现同相轴下拉效应。另外,在气底辟里会出现一系列不连续但是反射强烈的短轴,即所谓的增强反射体。气底辟在南海北部的陆坡区极为发育,气底辟即气烟囱是由深部活动热流体作用沿活动断裂或裂隙带上升形成的一种特殊的伴生构造,对天然气水合物的形成起到至关重要的作用。南海北部陆坡的地震剖面中气底辟发育的地方大都有断层贯穿其中,贯穿封闭层的层内密集分布的正断层系统释放超压孔隙流体。深部断裂与底辟构造的发育,提供了气体垂向运移的通道(图7);而在浅部,天然气水合物的形成主要是通过气体沿不整合面等侧向运移到水合物形成的温压带。气底辟是活动断裂或裂隙带的反映,也与天然气水合物的形成及分布密切相关。

3.6 其他地质灾害类型

3.6.1 泥底辟

泥底辟多为具塑性的泥质沉积受重力作用而形成的。本区共发现为数不多的出露底辟。它与岩浆侵入体有时候难以区分,但出露水面时,常因其软弱性顶部被海水改造,表层出现波状或冲沟(图8)。研究区泥底辟常与活动断裂伴生,也许活动断裂为泥底辟刺穿或活动的通道。在天然气赋存的区域,频繁的泥底辟往往会破坏气藏,导致其逸散,是不利的灾害因素。

3.6.2 不规则基岩面

研究区基岩面与陡坎、滑坡或断层等伴生,具有较大的潜在危害。在浅剖、地震剖面中均有反映。基岩顶面通常呈连续性很好的强反射,有时与陡坎、滑坡或断层伴生,起伏有时特别明显,其内部反射杂乱无层次。在一些地方,基岩埋藏深度很浅,起伏较大,有的基岩直接出露海底,有的距海底近几米或几十米,主要分布在陆坡深水区和台地周围。不规则基岩面的起伏急剧变化对近海工程设计将有直接影响。

4 地质灾害类型空间分布特征

基于上述灾害地质因素地球物理识别特征,对研究区灾害地质因素分别进行了解译,按照其形成

动力、类型、分布、数量及资料来源进行了统计(表3),同时叠加地形资料各类灾害地质因素汇总成一张平面分布图(图9),总体来看,研究区发育的灾害地质因素与岸线近于平行分布,呈NE向分布,局部区域又因受局部地形、底流、地层结构及局部构造影响呈现不同特征,下面根据成因将灾害地质因素分为6大类进行分区并阐明其分布特征。

火山密集区:南海北部陆坡区共发育2片火山密集区。最壮观的一片分布在东沙海域大于800 m等深线尖峰海山以东至北坡海山及以西的海域,这里海山成群出现(图9,图10),分布密集,数目大于20座;另外一片分布在神狐海域西南角,从地震剖面上发现海山3座。

等深流沉积密集区:研究区共发育2处,一处位于东沙海域东部水深2500 m以下北坡海山以东的区域,该处等深流沉积特征典型,并伴有大面积的BSR分布。另一处位于神狐海域东北,该处位于埋藏三角洲区的前缘,也发育在一片滑坡沉积体的顶部,该处也有BSR分布,但不典型。

海底滑坡密集区:研究区滑坡发育普遍,神狐和东沙地区主要发育了24条滑坡带,其分布主要与地形的坡度直接相关,单纯从影响地形坡度的因素可以分为3大类:与坡折带相关的滑坡、与岩浆侵入隆起相关的滑坡、与侵蚀峡谷相关的滑坡。神狐和

东沙地区与坡折带相关的滑坡最多,共有14条;神狐和东沙地区越往东南方向水深加深的地方,岩浆的侵入作用越明显和频繁,与岩浆侵入隆起相关的滑坡共有7条,神狐地区发育4条,东沙地区发育3条;与侵蚀峡谷相关的滑坡带共有3条,神狐地区2条,东沙地区1条。

埋藏三角洲密集区:发育具有明显的地区性,主要分布在神狐海域200~500 m东部的陆坡上,该处埋藏三角洲有多期,有的在3期或3期以上,叠置连片发育,面积广阔。该处亦是水合物发育的有利地带,这里还夹杂着复杂的水动力影响。

滑塌密集区:主要分布神狐海域,位于埋藏三角洲区西部,水深范围及地形相似,但面积大于前者,该区也有水合物矿藏发育,是天然气水合物聚集的有利场所。

浅层断裂密集区:研究区发育最典型的地区在东沙海域水深200~1000 m卫滩隆起以东的宽缓陆坡部分,该区浅层断裂及活动断裂密集分布,断裂引起的地层陡坎也十分发育。

浅层基岩面密集区:总体上发育于水深线500 m以下的海域,大面积的发育区有4处。一处分布在西沙海槽东段的南部地区。浅层基岩面最显著的一处是神狐海域115°E~116°E之间水深接近2000 m的东南水域,这里基岩埋藏面积大,埋藏深

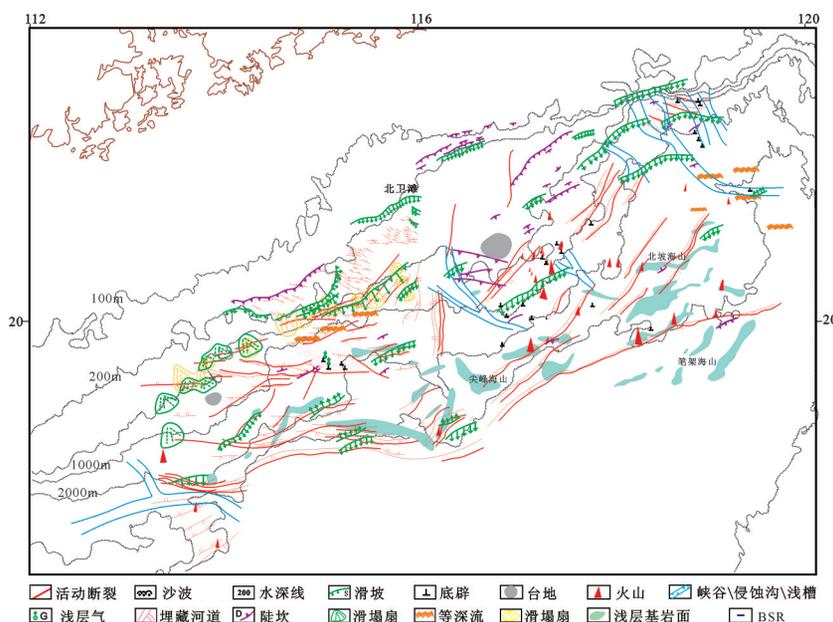


图9南海北部陆坡天然气水合物成矿区地质灾害类型分布图

Fig. 9 Geohazards distribution related to gas hydrate on northern continental slope of the SCS

度极浅,有的已经出露海底。神狐海域还发育一处浅层基岩面埋藏区,位于神狐海台东部,该处发育面积较小。第四处位于东沙海域尖峰海山以东、笔架海山以北、北坡海山以西及以南的三角地带,该处多发育岩浆侵入使一侧地层隆起成为陡坎,另一侧地层落差大,落空面基岩露出的情况。

5 讨论

5.1 影响灾害地质因素发育的因素

南海北部陆坡区在构造上位于构造活动历史复杂的地区,新构造作用非常活跃,区内发育着众多断层,活动断裂在研究区发育十分密集,主体为正断层,剖面上深部断距大而浅部断距较小,分为NE、NEE-EW、NW向三组,控制了绝大多数5级以下地震的分布空间和位置。NE向断裂属于深大断裂,切割地层跨度大,控制了本区陆坡整体走向和地形地貌的发育,为深部气体的垂向运移提供了良好的通道,形成了气烟囱。NEE-EW向断裂中生代为压剪性断裂,在南海陆缘第二次扩张时转换为张性构造线,以张性断层为主,控制新生代盆地以及上新世以来的玄武岩分布,是南海北部的构造-沉积格架,沿断裂带有基性岩浆上升、热流增高等特点。NW是一组新生的并且活动性强的断裂,切割其它方向的断裂并且与NEE向断裂呈棋盘状交错排列,使得南海北部陆缘形成了“南北分带,东西分

块”的构造格局。在NW向断裂系与NE向断裂相交错的位置震源出现丛集分布,由此可见,NW向断裂近期的活动性制约了地震的活动。从地震分布来看,地震活动东强西弱,北强南弱,很不均匀。地震附近普遍发育海底滑坡,显示两者存在密切关系。南海北部陆坡区在上新世之后第四纪沉积加速,尤其是近2~4 Ma以来,沉积速率增加了2~10倍。如此高的沉积速率迅速使陆坡区沉积物增加,沉积层变厚,层内形成超压,一方面含气超压流体间歇性释放形成泥底辟/泥火山及气烟囱,同时渗透层中的流体在压力场中发生迁移,形成抗剪强度很弱的沉积物液化层,容易导致上部沉积物滑动,形成海底滑塌/滑坡,同时海底沟谷对下伏地层和侧壁的逐步侵蚀冲刷,又进一步促进了滑塌/滑坡作用。

5.2 与水合物形成与分解的关系

研究区独特的地质构造、地形、水深条件为水合物的形成奠定了有利的背景,同时,区内海底温度为6~14°,区域热流值相对较低,沉积速率较高,适宜的压力场控制了研究区稳定带厚度,水合物稳定域底界为150~250 m,这些都为水合物的形成提供了有利条件(苏丕波等,2017)。研究区发育的对天然气水合物赋存造成破坏或给水合物开采带来不利影响的灾害地质因素主要有:海底滑坡/滑塌、地震、活动断层、侵蚀沟谷、岩浆底辟、泥底辟等。灾害地质因素与水合物的关系比较复杂,对于水合

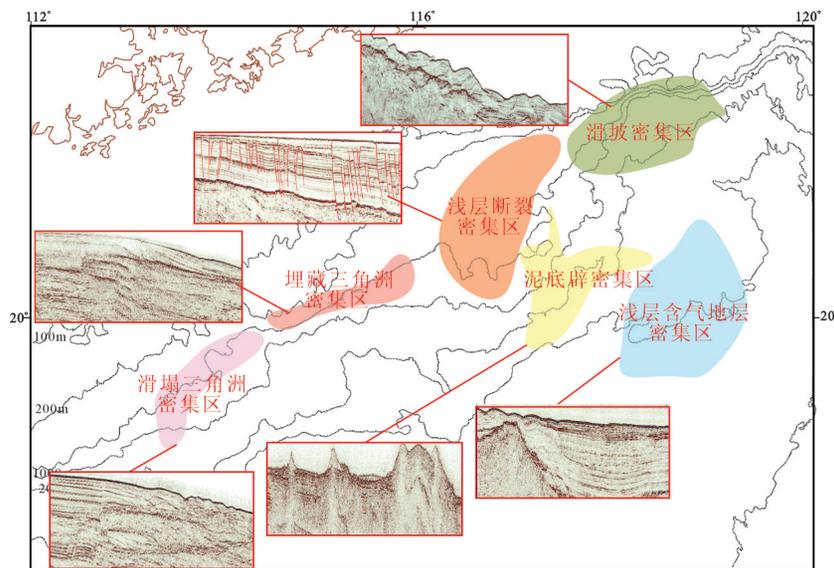


图10 南海北部陆坡天然气水合物成矿区地质灾害类型区划图

Fig. 10 Geohazards types distribution associated with gas hydrate on northern continental slope of the SCS)

物的形成有建设性作用,但灾害地质因素的发育演化又可能会破坏水合物稳定域的温压条件,从而导致水合物分解。研究区内多种灾害地质因素类型往往是共同作用,互相促进又互相制约,与水合物的形成与分解表现为动态平衡的关系。钻探结果显示尤其是高饱和度的水合物与BSR相关性不强,而与气体渗透及断裂构造、泥底辟等特殊地质体关系密切(吴能友等,2013)。南海北部陆坡自中新世以来发生过两期碰撞,断裂活动时间主要在1.5~2 Ma时期(王力峰等,2010),新构造活动产生一系列高角度断层和垂向裂隙体系,直接破坏了水合物稳定域的压力条件使得水合物分解,这种分解作用释放出巨量的气体,在沉积地层中形成超压,超压积累到一定程度使得地层中的抗剪压力小于剪切力时,就发生滑塌或出现海底滑坡,同时触发地层中超压流体塑性流动,形成泥底辟,构造活动触发地层失稳后,沉积物被迅速埋藏,快速堆积的滑塌体及埋藏古河道中的富含有机质的细粒物质加上适宜的温压环境,易于形成自生自储式水合物矿体(于兴河等,2005),断层常沟通滑塌体、埋藏古河道以及深部地层,这又为气体垂向运移提供了有利通道,同时,孕灾特殊地质体与下伏及周围地层直接存在异性界面(如渗透率、压力、盐度等),这种物性差异性界面有利于气体运移。当构造活动趋于平静后,拉张作用形成的裂隙迅速被细粒沉积物充填,这时候构造应力与重力的叠加作用导致断层面所承受的压力增加,同时沉积体沿着滑移面滑动时的压力及摩擦力也在不断增加,滑坡内部充填的结构致密的细粒沉积物,渗透率变小,而且断层的塑性围岩所产生的构造变形导致部分裂隙愈合,故易于形成封堵;古海底滑坡结束之后,气源在断层或者气烟囱的垂直运移以及不整合面等的横向运移作用下,在合适的温压条件下达到水合物的稳定初始状态,进而在形成BSR,在新构造运动影响下,会导致新一期的滑坡或者水合物的分解,而新一期的滑坡也会破坏水合物的温压条件致使水合物分解,滑坡结束以后,水合物又再次发育。水合物与海底滑坡一直处于一个动态的发展过程中。

6 结 论

(1)南海北部陆坡区发育了多种灾害地质因素,

主要包括:活动断裂、地震、火山、岩浆底辟、陡坎;受水动力控制的有滑塌三角洲、陡坎、峡谷、侵蚀沟、浅槽、等深流、埋藏河道、埋藏三角洲、浅层气、气底辟(气烟囱)和不规则基岩面。按照灾害因素的动力来源及成因可将研究区地质灾害类型分为5大类:构造应力、重力、水动力、气动力及其他类型。

(2)南海北部陆坡独特的构造背景及陆坡环境是控制研究区灾害地质因素形成的主要因素,总体来看,平面分布上表现为与岸线近乎平行分布,呈NE向分布,局部区域又因受海底底流、侵蚀充填作用及局部构造影响呈现不同特征。

(3)研究区发育的灾害地质因素与水合物的关系比较复杂,多种灾害地质因素类型往往是共同作用,互相促进又互相制约,与水合物的形成与分解表现为动态平衡的关系。一方面对于水合物的形成有建设性作用,各种孕灾特殊地质体对水合物气源的产生、运移及成藏都提供了有利条件,但当灾害地质因素的发育演化过程破坏了水合物稳定域的温压条件就会导致水合物分解。

References

- Capenter G B, Mccarthy J C. 1980. Hazards Analysis on the Atlantic Outer Continental Shelf[C]//12th Annual O.T.C Proceedings,419-424.
- Chen Hongjun, Huang Lei, Peng Xuechao, Wu Jiaoqi, Li Wencheng, Wang Yingmin. 2012. Discussion of characteristics and formation of landslide zones in the gas hydratesurvey 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 JiangXin, Guan Yongxian, Song Haibin, Yang Shengxiong, Geng Minghui, Bai Yang, Liu Boran. 2015. Distribution characteristics and geological implications of pockmarks and mud volcanoes in the northern and western continental margins of the South China Sea[J].Chinese Journal of Geophysics,58(3):919-938(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Feng Wenke, Xue Wanjun. 1996. The Geozards And Engineering Geological Condition in the North of South China Sea[M]. Nanjing:Hehai University Press,10-100(in Chinese with English abstract).
- Gong Zaisheng. 2004. Study on Dynamics of Continental Margin Reservoir Formation of South China Sea[M]. Beijing:Science Press (in Chinese with English abstract).

- Guo Yinqun, Wang Liaoliang, Kuang Zenggui, Zhong Guangfa. 2012. The Sedimentary characteristics of contour current[J]. Marine Geology Frontiers,28(6):1-9(In Chinese with English abstract).
- Hesselbo S P, Gröcke D R, Jenkyns H C, Bjerrum C J, Farrimond P, Morgans Bell H S, Green O R. 2000. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event[J]. Nature, 406:392-395.
- Heezen B C, Hollister C D, Ruddiman W F. 1966. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents[J]. Science, 152(3721):502-508.Doi:10.1126/10.1126/Since.152.3721.502.
- Hui Gege, Li Sanzhong, Guo Lingli, Zhang Guangxue, Gong Yuehua, Somerville I D, Zhang Yong, Zheng Qiliang, Zang Yibo. 2016. Source and accumulation of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 69: 127-145.
- Kou Yangqi, Du Deli. 1994. Sedimentary features of shallow ancient river channels on the northern shelf of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica,68(3):268-277(in Chinese with English abstract).
- Liu Ke, Wang Jianhua. 2016. Characteristic of neotectonic activities and dividing parameters of earthquake zone in the Northern South China Sea[J]. 36(2):85-92(in Chinese with English abstract).
- Lu Chengbin, Zhan Wenhuan, Liu Yixuan. 1991. Analyses on fault activity and regional stability in the Pearl River Mouth[J]. Tropic Oceanology, 10(1):5-12(in Chinese with English abstract).
- 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):102-111(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]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 39(9):1364-1372(in Chinese with English abstract).
- Milkov A V. 2004. Global estimate of hydrate-bound gas in marine sediments:how much is really out there?[J]. Earth Science Reviews, 66(3/4):183-197.
- Rao Y H, Subrahmanyam C, Rastogi A, Deka B. 2002. Slope failures along the western continental margin of India:a consequence of gas-hydrate dissociation,rapid sedimentation rate,and seismic activity?[J]. Geo-Mar. Lett. (2002)22: 162-169.doi:10.1007/s00367-002-0107-9.
- Smith D E, Harrison S, Jordan J T. 2013. Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins[J]. Quaternary Science Reviews, 82(2013): 93-103.
- Sha Zhibin, Wang Hongbin, Zhang Guang xue, Yang Muzhuang. 2005. The relationships between diaper structure and structure and gas hydrate mineralization[J]. Earth Science Frontiers,12(3):283-288 (in Chinese with English abstract).
- Su Ming, Yang Rui, Wu Nengyou, Wang Hongbin, Liang Jinqiang, Sha Zhibin, Cong Xiaorong, Qiao Shaohua. 2014. Structural characteristics in the Shenhu Area, Northern continental slope of South China Sea, and their influences on gas hydrate[J]. Acta Geologica Sinica, 88(3):318-326(in Chinese with English abstract).
- Su Ming, Sha Zhibin, Kuang Zenggui, Qiao Shaohua, Liang Jinqiang, Yang Rui, Wu Nengyou, Cong Xiaorong. 2015. Erosion and Sedimentation of the submarine canyons and the relationship with gas hydrate accumulation[J]. Geoscience, 29(1):155-162(in Chinese with English abstract).
- Su Pibo, Liang Jinqiang, Fu Shaoying, Gong Yuehua. 2017. Geological background and accumulation models of gas hydrate reservoir in northern South China Sea[J]. Geology in China, 44(3):415-427 (Chinese with English abstract) (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).
- Timo Zander, Jung Chan Choi, Maarten Vanneste, Christian Berndt, Anke Dannowski, Brian Carlton, Joerg Bialas. 2017. Potential impacts of gas hydrate exploitation on slope stability in the Danube deep-sea fan, Black Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2017.08.010.
- Traylor M H, Dillon W P, Pcher I A. 2000. Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir:new insights from seismic data.164:79-89.
- Wang Hairong, Wang Yingming, Qiu Yan, Peng Xuechao, Liu Yiyao. 2008. Geomorphology and its control of deep-water slope of the margin of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica,30(2): 70-79(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongbin, Zhang Guangxue, Liang Jin, Liu Xue Wei, Liang Jinqiang, Gongyue Hua, Guo Yi Qun, Sha Zhibin. 2008. Gas hydrates in the SSBZ in the north slope of the South China Sea[J]. Acta sedimentologica Sinica, 26(2):283-293(in Chinese with English abstract).
- Wang Lifeng, Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Lu Jingan. 2010. Analysis of gas hydrate absence induced by the late-stage diapir domination in the borehole SH5 of Shenhu Area[J]. Geoscience, 24(3): 450-456(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofei, Li Sanzhong, Gong Yuehua, Suo Yanhui, Dai Liming, Ma Yun. 2014. Active tectonics and its effect on gas hydrates in Northern South China Sea[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition, 44(2):419-413(in Chinese with English abstract).
- Wu Nengyou, Zhang Guangxue, Liang Jinqiang, Su Zheng, Wu Daidai, Lu Hailong, Lu Jingan, Sha Zhibin, Fu Shaoying, Gong Yuehua, Xu Huaning, Liu Lihua, Su Ming, Guan Hongxiang, Yang Rui. 2013. Progress of gas hydrate research in Northern South China Sea[J]. Advances in New and Renewable Energy, 1(1): 80-94(in Chinese with English abstract).

- Wu Shi Guo, Sun Yunbao, Wang Xiujun, Zhao Qiang, Liu Feng, Dong Dongdong. 2010. Geophysical signature and detection of shallow water flow in the deepwater basin of the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(7): 1681-1690 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xinghe, Wang Jianzhong, Liqiang Jinqiang, Li Shunli, Zeng Xiaoming, Sha Zhibin, Kuang Zenggui, Li Wen. 2014. Depositional accumulation characteristics of gas hydrate in the northern continental slope of South China Sea[J]. Acta Petroli Sinica, 35(2): 253-264 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xinghe, Zhang Zhijie. 2005. Characteristics of Neogene depositional systems on the northern continental slope of the South China Sea and their relationships with gas hydrate[J]. Geology in China, 32(3): 470-476 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangxue, Zhu Youhai, Xu Huaning. 2003. Gas Hydrate on the Passiv Continental Margin and Its Pool-formation Process. GEOLOGICAL Review[J]. 49 (2): 181-186 (in Chinese with English Abstract).
- Zhong Jianqiang. 1989. Active faults and seismic activities in pearl river mouth basin and neighboring region[J]. Tropic Oceanology, 8 (3): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- Zou Heping. 1995. On The Diwa basin system of continental margin spreading type and its genetic mechanism[J]. Geotectonica et Metallogenia, 19(4): 303-313 (in Chinese with English Abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈泓君, 黄磊, 彭学超, 吴峻岐, 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.
- 陈江欣, 关永贤, 宋海斌, 杨胜雄, 耿明会, 拜阳, 刘伯然. 2015. 麻坑泥火山在南海北部与西部陆缘的分布特征和地质意义[J]. 地球物理学报, 58(3): 919-938.
- 冯志强, 冯文科. 1996. 薛万俊. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件[M]. 南京: 河海大学出版社, 10-100.
- 龚再升. 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 郭依群, 王嘹亮, 匡增桂, 钟广法. 2012. 等深流沉积特征[J]. 海洋地质前沿, 28(6): 1-9.
- 寇养琦, 杜德莉. 1994. 南海北部陆架第四纪古河道的沉积特征[J]. 地质学报, 68(3): 268-277.
- 刘科, 王建华. 2016. 南海北部新构造活动特征及地震区带划分参数分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(2): 85-92.
- 陆成斌, 詹文欢, 刘以宣. 1991. 珠江口断裂的活动性于区域稳定性分析[J]. 热带海洋学报, 10(1): 7-14.
- 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): 102-111.
- 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.
- 沙志彬, 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 梁金强. 2005. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系[J]. 地学前缘, 12(3): 283-288.
- 苏明, 沙志彬, 匡增桂, 乔少华, 梁金强, 杨睿, 吴能友, 丛晓荣. 2015. 海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏[J]. 现代地质, 29(1): 155-162.
- 苏明, 杨睿, 吴能友, 王宏斌, 梁金强, 沙志彬, 丛小荣, 乔少华. 2014. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制[J]. 地质学报, 88(3): 318-326.
- 苏丕波, 梁金强, 付少英, 吕万军, 龚跃华. 2017. 南海北部天然气水合物成藏地质条件及成因模式探讨[J]. 中国地质, 44(3): 415-427.
- 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.
- 王海荣, 王英民, 邱燕, 彭学超, 刘轶瑶. 2008. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. 海洋学报, 30(2): 70-79.
- 王宏斌, 张光学, 梁劲, 刘学伟, 梁金强, 龚跃华, 郭依群, 沙志彬, 2008. 南海北部陆坡构造坡折带中的天然气水合物[J]. 沉积学报, 26(2): 283-293.
- 王力峰, 沙志彬, 梁金强, 陆敬安. 2010. 晚期泥底辟控制作用导致神狐海域SH5站位未获水合物的分析[J]. 现代地质, 24(3): 450-456.
- 王霄飞, 李三忠, 龚跃华, 索艳慧, 戴黎明, 马云, 张丙坤. 2014. 南海北部活动构造及其对天然气水合物的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 419-431.
- 吴能友, 张光学, 梁金强, 苏正, 郭黛黛, 卢海龙, 陆敬安, 沙志彬, 付少英, 龚跃华, 徐华宁, 刘丽华, 苏明, 管红香, 杨睿. 2013. 南海北部陆坡天然气水合物研究进展[J]. 新能源进展, 1(1): 80-94.
- 吴时国, 孙运宝, 王秀娟, 赵强, 刘峰, 董冬冬. 2010. 南海北部深水盆地浅水流的地球物理特性及识别[J]. 地球物理学报, 53(7): 1681-1690.
- 于兴河, 王建忠, 梁金强, 李顺利, 曾小明, 沙志彬, 匡增桂, 李文. 2014. 南海北部陆坡天然气水合物沉积成藏特征[J]. 石油学报, 35(2): 253-264.
- 于兴河, 张志杰. 2005. 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与天然气水合物分布的关系[J]. 中国地质, 32(3): 470-476.
- 张光学, 祝有海, 徐华宁. 2003. 非活动大陆边缘的天然气水合物及其成藏过程述评[J]. 地质论评, 49(2): 181-186.
- 钟建强. 1989. 珠江口盆地及其邻域的活动断裂与地震活动[J]. 热带海洋, 8(3): 11-19.
- 邹和平. 1995. 陆缘扩张型地洼盆地系及其形成机制探讨[J]. 大地构造与成矿学, 19(4): 303-313.