

琼东南海域冷泉微地震响应特征初探

胡 广,黄建宇,杨胜雄,李沅衡,田冬梅,曹荆亚,周军明,邓雨恬

Preliminary study on microseismic response characteristics of cold seep in Qiongdongnan sea area: A case study of "Haima" cold seep

HU Guang, HUANG Jianyu, YANG Shengxiong, LI Yuanheng, TIAN Dongmei, CAO Jingya, ZHOU Junming, and DENG Yutian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024090903

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海海马冷泉区沉积物孔隙水地球化学特征对冷泉活动的指示

Geochemical characteristics of sediment pore water in Haima area of the South China Sea: An indication of cold seeps 海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 1-14

非线性层析技术在琼东南天然气水合物成像中的应用

Application of non-linear tomography technology to gas hydrate imaging in the Qiongdongnan area 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 206-213

南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演

Frequency-divided inversion method of heterogenous natural gas hydrates reservoir in the Shenhu area, South China Sea 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 106-120

海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望

A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep 海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 200-213

南海神狐海域天然气水合物微观赋存特征的超分辨率CT图像识别

Super-resolution CT image recognition of micro-occurrence characteristics of natural gas hydrates from Shenhu area in northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(3): 149-159

冷泉环境自生矿物多硫同位素特征及应用

Characteristics and application of multiple sulfur isotopes of authigenic minerals in cold-seep environment 海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 62-75



关注微信公众号,获得更多资讯信息

胡广,黄建宇,杨胜雄,等.琼东南海域冷泉微地震响应特征初探——以"海马"冷泉为例[J].海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 12-24. HU Guang, HUANG Jianyu, YANG Shengxiong, et al. Preliminary study on microseismic response characteristics of cold seep in Qiongdongnan sea area: A case study of "Haima" cold seep[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 12-24.

琼东南海域冷泉微地震响应特征初探 ——以"海马"冷泉为例

胡广1,黄建宇2,杨胜雄1,李沅衡1,田冬梅1,曹荆亚1,周军明1,邓雨恬1 1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

2. 广州海洋地质调查局, 广州 511458

摘要:海底天然气水合物区的冷泉系统中流体在运移过程中会冲击浅部地层,使下部地层中的流体物质发生"固-液-气"转化, 其释放的能量导致裂隙坍塌和孔隙破裂,进而产生一系列与冷泉活动相关的微地震信号。这些微地震信号能够直观准确地反 映天然气水合物区冷泉系统的生长发育状态及生命周期,揭示其流体逸散活动规律。本文研究了琼东南海域"海马"冷泉区 2014和2021年的两次不同时间监测到的地震数据,经过相应的预处理,利用长短时窗能量比方法识别出了大量与冷泉活动相 关的微地震事件。通过对这些微地震信号的波形、频谱特征和时间分布特征分析,了解了琼东南海域天然气水合物区冷泉微 地震事件的响应特征。初步研究结果表明,"海马"冷泉区的冷泉活动产生的微地震事件包括短扰动信号和典型的冷泉微地 震信号:波形尾部呈现类似指数的有规律的衰减,持续时间为0.3~2s,主频分布在4~26Hz以内。微地震活动不存在明显的 类似潮汐的时间分布规律,多呈现短期集中分布的特点,这可能与冷泉喷口的活动及活动的强弱有关。 关键词:天然气水合物;"海马"冷泉;微地震事件;短时信号;琼东南海域

中图分类号:P736.4 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024090903

Preliminary study on microseismic response characteristics of cold seep in Qiongdongnan sea area: A case study of "Haima" cold seep

HU Guang¹, HUANG Jianyu², YANG Shengxiong¹, LI Yuanheng¹, TIAN Dongmei¹, CAO Jingya¹, ZHOU Junming¹, DENG Yutian¹

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China

Abstract: During the migration, fluid in the cold seep system of the submarine natural gas hydrate area will impact the shallow strata, causing the fluid material in the lower strata to undergo a "solid-liquid-gas" transformation. The energy released could cause fracture collapse and pore rupture, thereby generating a series of vibration events. These microseismic signals can visually and accurately reflect the growth and development status and life cycle of the cold seep system, and reveal the laws of its fluid escape activities. We studied the microseismic data monitored at two different times in 2014 and 2021 near the Haima cold seep area in the Qiongdongnan waters. After preprocessing the data, a large number of microseismic events related to cold seep activities were identified using the STA/LTA (short term average/long term average) method. By analyzing the characteristics of waveform, spectrum, and time distribution of these microseismic signals, the response characteristics of the cold seep microseismic events in the natural gas hydrate area in the Qiongdongnan waters were clarified. Preliminary research results show that the microseismic events generated by the cold seep activity in the Haima cold seep area include short duration events and typical cold seep microseismic signals; the tail of the waveform shows a regular and exponential-like decay, with a duration of 0.3~2 s and a main frequency range of 4~26 Hz. There is no obvious tidal-like time distribution pattern for cold seep microseismic activity, and it mostly shows the characteristics of short-term concentrated distribution, which may be related to the activity and strength of the cold seep vents.

Key words: natural gas hydrate; Haima cold seep; microseismic events; short duration event; Qiongdongnan sea area

资助项目:国家自然科学基金"南海北部高富集天然气水合物储层特征与成藏控制机理研究"(U2244224);广州市基础研究计划与基础应用研 究项目"基于深度学习的冷泉羽状流地震资料高分辨率处理方法研究"(2023A04J0917);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州) 引进高端人才项目(GML2020GD0802)

作者简介:胡广(1988—),男,博士,主要从事天然气水合物地震响应特征分析研究,E-mail: huguang@gmlab.ac.cn

通讯作者:杨胜雄(1964—),男,博士,正高级工程师,主要从事大洋矿产资源调查研究、海洋地质地球物理研究,E-mail; yangsx@gmlab.ac.cn 收稿日期:2024-09-09; 改回日期:2024-12-03. 张现荣编辑

全球天然气水合物潜在资源总量约为(1~5)× 10¹⁵ m^{3[1-2]},其中海洋天然气水合物约占天然气水合 物总量的 97%^[3],具有巨大的能源开发前景。世界 各国尤其是发达国家及能源短缺国家高度重视天 然气水合物成藏理论、勘探开发等方面的研究。 近20年来,根据中国众多学者在勘探实践中基于 多种不同方法的资源量评估发现,中国南海北部天 然气水合物远景资源量评估结果可达 600~900 亿 t 油当量[45]。海底冷泉活动与天然气水合物密切相 关,天然气水合物分解的产物是冷泉活动的主要气 源之一[6-8]。活动冷泉系统在流体运移喷发过程中 通常会引起下部地层中流体物质"固-液-气"转化, 其释放能量导致孔隙破裂等地压释放、震动,以及 浅部地层经流体冲击等外力导致的裂隙、坍塌等震 动事件[9-10]。这些微地震事件能直观准确地反映冷 泉系统生长发育状态及生命周期,对了解天然气水 合物区的流体运移规律、气体分布的时空模式和气 体排放的触发机制具有重要意义。

微地震监测技术目前主要针对陆地油田的开 发,基本做法是通过在井中或地面布置检波器接收 生产活动所产生或诱发的微小地震事件,并通过对 这些事件的反演求取微地震震源位置等参数,然后 应用这些参数对生产活动进行监控或指导。海域 和陆域的微地震资料采集原理虽然相同,但是采集 方法却差别很大,海水和海底情况的复杂性,使海 域天然地震采集站点部署难度增大,这造成了采集 站点数量和分布均匀性远远低于陆域。海底地震 仪(ocean bottom seismographs, OBS)是一种重要海 底观测工具,通过船进行定点大量投放和沉底式的 采集方法,可以对特定海域进行流动观测[11-14]。海 底地震仪能够记录地震产生的 P、S 波,既能用于天 然地震(被动源)观测,又能用于海上人工地震(主 动源)勘探。海底实际情况十分复杂,通过海底地 震仪可以记录各种海洋活动的信号,例如天然地震 信号[15-16]、海洋波浪产生的微震噪音[17]、地球的"喘 息"[18] 以及地球的自由振荡等相对低频的震动信 号19,此外还有推测可能与海洋哺乳动物的叫 声[20-22] 或海底浅层的地质运动过程[23-24] 相关的大量 的高频震动事件,因为其单个信号的持续时间较常 规地震信号短,故称其为短时事件(short duration event, SDE).

大量在全球富含天然气水合物的海域,与海底 沉积层冷泉区流体物质逸散过程相关的微地震事 件已经被海底地震仪所记录下来,如厄瓜多尔北部 俯冲带^[25]、马尔马拉海^[26-27]、尼日尔三角洲地区^[28]、 斯瓦尔巴特海域^[29],以及中国南海北都神狐海域^[30]、 琼东南海域^[31-32]和西北次海盆^[33]。可见国内外对海 洋领域天然气水合物的深入研究以及对海底地震 观测实验的开展积累了大量的海底地震资料,其中 更是包括大量与冷泉活动相关的微地震记录数据^[34]。 然而中国对天然气水合物区冷泉活动产生的微地 震事件规律特征研究还极其有限,特别是对南海海 域冷泉系统的微地震的相关研究,缺乏对冷泉活动 产生的微地震事件信号特征、频率特征和影响因素 的相应认识。

鉴于此,本文以琼东南海域"海马"冷泉区附近 2014年4月和2021年11月两次不同时间段的海底 地震仪监测到的微地震数据为研究对象,通过对两 组观测数据进行针对性处理,利用经典的长短时窗 能量比方法(short term average/long term average, STA/LTA)识别出与冷泉系统流体逸散活动相关的 微地震事件,并重点分析了识别出的冷泉活动微地 震事件波形特征、频谱特征、时频特征和时间分布 特征,对琼东南海域冷泉活动产生的微地震响应特 征进行了初步探讨。

1 研究区和监测数据概况

本文研究区位于与天然气水合物赋存相关的 大型活动冷泉"海马"冷泉附近,"海马"冷泉位于琼 东南盆地西部海域区,盆地构造上属新生代大陆边 缘裂谷形成的复合盆地,发育富有机质的第四纪沉 积和新近系上新统海相泥岩,具有良好的生烃环 境[35-36]。"海马"冷泉区海底地势平缓,总体呈东西 向条带状展布,水深为1350~1430m,面积约为 618 km², 其中已探查有冷泉活动的区域约 350 km², 约占海马冷泉区面积 56.6%[37]。"海马"冷泉区作为 珠江口盆地发现的海底巨型活动型冷泉区域,整体 气体渗漏现象非常明显,且是以甲烷为主要气体渗 漏形成的活动冷泉区,气体渗漏活动具有时空迁移 性[38]。详细的地质背景资料及大量的活动冷泉和 丰富的气源活动,都表明"海马"冷泉区是研究天然 气水合物冷泉系统微地震信号特征规律的重要场 所^[39-40]。

本文研究数据是以中国地质调查局广州海洋 地质调查局在2014和2021年两个不同航次投放的 海底地震仪所记录的数据为基础,两个航次海底地 震仪的投放位置如图1所示,第一次的海底微地震 数据记录于2014年4月18日,主动源勘探记录,期 间共投放了13台海底地震仪,这些海底地震仪平



图 1 两个不同时间段的海底地震仪投放位置 Fig.1 The deployment locations of the ocean bottom seismographers in two different periods

均有效记录时长均达到了约24h。第二次分析数据 为2021年11月份投放的1台Geopro海底地震仪 所记录的长周期的微地震监测数据,该海底地震仪 布放于11月5日,回收于11月19日,有效记录时 间约为14d。两次投放的海底地震仪台站的投放时 间、仪器采样率、台站编号和记录时长的具体记录 信息如表1所示。

表 1 两次投放的海底地震仪采样率、台站编号和 记录时长

 Table 1
 The sampling rate, station number, and recording duration of the ocean bottom seismographers in the two deployments

投放时间	采样率/Hz	台站编号	记录时长	
		S10	83 760 s	
		S12	86 160 s 88 140 s 90 660 s	
		S14		
		S16		
		S18	92 400 s	
		S20	94 500 s	
2014年 4月18日	500	S22	96 660 s	
1)1101		S24	98 160 s	
		S26	100 560 s	
		S28	102 840 s	
		S30	104 280 s 106 260 s	
		832		
		S34	108 300 s	
2021年 11月6日	250	Geopro台站	约14 d	

在 2014年 4 月 18 日投放的海底地震仪台站 中,13 台仪器平均记录时长约 24 h,记录数据整体 上信噪比较高,所有仪器环境噪声均维持在较低的 水平,与冷泉活动微地震信号在能量上存在较大差 别,因此全部作为研究数据进行分析。对于 2021 年 11 月 6 日投放的单台海底地震仪 Geopro 台站, 整体背景噪声情况较为严重,有效信号能量相较于 噪声能量更弱,能量较低、振幅较小的冷泉活动微 地震信号被淹没在背景噪声之中,但是整体时长达 到了 14 d,通过一定处理可以作为长周期监测数据 进行分析。以这两个不同时间段、不同台站数量和 不同记录时长的海底地震仪数据为研究对象,来初 步分析"海马"冷泉区冷泉系统的微地震响应特 征。图 2 为两次投放的海底地震仪中 S12 台站和 Geopro 台站四分量微地震记录。

2 冷泉区微地震数据处理及微地震事 件识别

2.1 微地震数据处理

通过对两次不同时间段的海底地震仪记录数 据初步整理发现,在两次不同时间段的记录数据 中,整体包含着许多不需要的非冷泉活动的微地震 信号,例如海洋声浪、固体地球相互作用、海洋地 震主动源勘探和仪器投放回收过程等不同频率的 干扰信号,这样会导致许多较弱的与冷泉活动相关 的微地震信号淹没在噪声中。为了在海底地震仪 记录的数据中显现出与冷泉活动相关的微地震记 录,参考天然地震数据处理方法并结合实际情况,



图 2 2014 年 S12 台站和 2021 年 Geopro 台站海底地震仪所记录的四分量微地震数据 Fig.2 The four-component microseismic data recorded by the S12 station in 2014 and the Geopro station in 2021

我们分别实施了数据裁剪、去线性趋势、去均值和 带通滤波等常规处理手段。

在对海底地震仪测试、投放和回收的过程中, 产生的一些强振幅干扰信号被记录下来。根据海 底地震仪测试投放和回收工作时间,对这些无效记 录进行裁剪,从而去掉这些强振幅干扰。此外,由 于波形数据总会存在一个长周期线性趋势或者一 个非零均值,会对地震信号分析、量取震级等工作 产生干扰,影响数据分析的准确性,必须在数据分 析前去除。因此,我们对两次监测数据首先进行了 数据裁剪、去线性趋势和去均值的处理操作。图 3a、 b分别为 S12 台站和 Geopro 台站 2021 年 11 月 6 日 记录的原始数据中 Z 分量经过数据裁剪、去线性趋 势和去均值后的结果。

此外,为了压制海底地震仪记录数据中存在的 背景噪声和其他的一些噪声,滤波是一种有效的手 段,可以保留有效信号,提高信噪比。根据冷泉微 地震活动相关的有效信号与噪声信号在频率上的 差异进行了带通滤波。对于 2014 年的 13 台海底地 震仪,由于是在主动源勘探作业期间进行记录的, 我们采用了 2~30 Hz 的带通滤波,以压制背景噪声 和主动源勘探信号。而 2021 年的单台 Geopro 海底 地震仪观测数据主要是环境噪声的干扰,我们则利 用 1~30 Hz 带通滤波进行环境噪声的压制。通过 图 3 可以看到经过带通滤波后,不仅保留了原有的 冷泉微地震信号,而且还能显现出被噪声压制的冷 泉微地震信号。两次观测数据经过相应的预处理 后,数据信噪比有明显的提升,与冷泉活动无关的 噪声大部分被压制。

2.2 冷泉活动微地震事件识别

为了研究与冷泉活动有关的微地震记录,需要 从处理好的记录中对其进行分辨和拾取。已有的 资料表明,目前已经发现的由冷泉等流体运移活动 所导致的微地震信号大致分为冷泉微地震事件信 号和短扰动信号两类。这些信号主要表现为持续 时间短、低主频、水听器信号缺失等特征,在振幅 上与常规地震事件存在差异,也没有明显的续至 波^[31-32]。对于简单的冷泉活动微地震事件,其振幅 特征明显,利用手动肉眼的方法即可拾取。但是海 底地震仪通常数据数量巨大,而且有些微地震事件 仅靠肉眼难以分辨,因此在这里我们采用自动拾取 方法来识别两组海底地震仪中的冷泉系统活动产 生的微地震事件和短扰动信号。

采用 Stevenson 提出的经典的基于长短时窗能 量比方法来识别冷泉微地震事件,该方法依据长、 短时窗内地震波平均能量比值来判定地震事件初 至波到时的方法,原理简单,计算效率高,被广泛应 用于天然地震领域^[41]。长短时窗能量比方法通过 所记录数据的能量(信号幅值的平方)的短时窗均 值(short term average, STA)和长时窗均值(long term average, LTA)之比来构建信号随时间的变化特征函 数,可以灵敏地反映信号幅度变化,其中短时窗均 值对事件(即信号的突变)较敏感,长时窗均值反映 台站背景噪声的信息。当震动信号到来时,引起短 时窗均值的变化快于长时窗均值,即长短时窗能量







比会出现突增;当长短时窗能量比大于预先设定的 阈值时,则判定为有效震动事件到达^[42-43]。长短时 窗能量比方法具体计算公式为:

$$STA(n) = \frac{1}{sw} \sum_{i=n-sw}^{n} CF(i)$$
(1)

$$LTA(n) = \frac{1}{lw} \sum_{i=n-lw}^{n} CF(i)$$
(2)

$$\frac{\text{STA}}{\text{LTA}}(n) = \frac{\text{STA}(n)}{\text{LTA}(n)} \ge R$$
(3)

其中 sw 与 lw 分别为短时窗与长时窗长度, n 为微 地震数据点, R 为设定阈值, CF 为特征函数, 不同的 特征函数可以表示在振幅、频率等方面的变化, 本 文中采用经典算法, CF(*i*) 为原始地震记录。

在进行基于长短时窗能量比方法识别冷泉微 地震事件时,长短时窗长度、阈值选取、表征函数 等参数均对冷泉微地震事件的拾取结果存在影响, 其中短时窗长度 sw 最为关键。根据两次海底地震 仪的记录情况,我们依照表 2 中参数设置对两组不 同时间段的海底地震仪地震记录进行基于长短时 窗能量比方法的自动识别。由于在 2014 年投放的

表 2 STA/LTA 方法拾取与冷泉活动相关微地震事件参数 设置

 Table 2
 The parameter settings of the STA/LTA method for

 picking up microseismic signals related to cold seep activity

数据投放 时间	STA设置 时间/s	LTA设置 时间/s	开始 触发值	结束 触发值
2014-04-18	0.1	2	10	2
2021-11-06	0.1	1	6	2

13 台海底地震仪中水听器分量中接收不到冷泉活动相关的记录,2021 年投放的单台海底地震仪中水 听器分量存在冷泉活动相关的微地震信号,我们只 对 2014 年投放的 13 台海底地震仪中 ENZ 三个分 量的记录进行了识别,而对 2021 年投放的单台海底 地震仪中 ENZH 四个分量的地震记录全部进行识 别,基于长短时窗能量比方法对"海马"冷泉区微地 震事件的识别过程和结果,如图 4 所示。2014 年投 放的 13 台海底地震仪和 2021 年投放的单台海底地 震仪记录数据中冷泉微地震事件识别结果,统计如 表 3 和表 4 所示。



图 4 S12 台站和 Geopro 台站中 STA/LTA 方法自动拾取的冷泉微地震事件

Fig.4 Cold seeps microseismic events automatically picked by the STA/LTA method at the S12 station and Geopro station

表 3 2014 年 4 月 18 日 13 台海底地震仪冷泉微地震事件拾 取数目统计

Table 3The statistics of cold seep microseismic eventsrecognized by 13 ocean bottom seismographers in 18 April 2014

台站 -	各分量上拾取数量/次			拾取总	两个分量	三个分量 同时	
	E分量	N分量	Z分量	量/次	数量/次	数量/次	
S10	62	44	54	160	21	28	
S12	6	3	7	16	1	2	
S14	16	11	10	37	2	6	
S16	27	23	101	151	9	15	
S18	11	20	42	73	10	4	
S20	609	298	465	1 372	185	249	
S22	82	72	22	176	38	13	
S24	38	40	17	95	15	12	
S26	92	51	41	184	26	15	
S28	21	18	40	79	7	12	
S30	7	11	28	46	3	4	
S32	160	190	461	811	84	105	
S34	15	16	6	37	8	2	
合计	1 1 4 6	797	1 2 9 4	3 2 3 7	409	467	

3 冷泉微地震事件特征分析

3.1 波形特征

在完成所有海底地震仪观测数据的冷泉微地 震事件拾取后,对识别出的冷泉微地震事件波形特 征进行分析,以了解冷泉微地震响应的信号波形特 征。在两组数据识别结果中,存在典型的短扰动信 号,这类信号持续时间较短,约为0.5~2s,仅包含 初至波,没有明显的续至波,信号的尾部像螺丝一 样有规律的衰减。除了短扰动信号,自动拾取的结 果还存在典型的冷泉微地震信号,这些信号事件波 形上与短扰动信号类似,但是持续时间相较短扰动 信号更短,平均持续时间为0.3~1s,同样也是无明 显的续至波。二者都是冷泉等流体运移活动所产 生的微地震信号。图 5 为在两组数据识别结果中 的短扰动信号和冷泉微地震信号,2014年拾取结果 中水听器分量表现为缺失状态,2021年拾取结果中 有些在水听器上存在明显的短扰动信号特征,这可 能与2021年投放的海底地震仪与冷泉活动震源位 置距离较近且冷泉活动事件的能量较强原因有关。

表 4 2021 年 11 月 6—18 日期间单台海底地震仪冷泉微地震 事件拾取数目统计

Table 4The statistics of cold seep microseismic events detectedby a single ocean bottom seismographer from November 6-18, 2021

日期 (2021年)	各分量上拾取数量/次			払取さ	两个分	三个分	四个分	
		N分量 Z分量 H分量	四八 巨.	山八旦	量/次	重向的 拾取到	重向时 拾取到	重向的 拾取到
	L7 里		Π汀里		数量/次	数量/次	数量/次	
11-06	10	40	33	12	95	4	0	0
11-07	25	1013	98	7	1143	8	3	2
11-08	22	9	152	3	186	4	0	0
11-09	25	8	6	14	53	1	1	1
11-10	14	7	8	6	35	4	0	0
11-11	23	19	13	10	65	8	0	1
11-12	22	3	2	5	32	1	0	0
11-13	24	8	7	4	43	1	1	1
11-14	11	11	9	25	56	4	0	1
11-15	22	2	8	18	50	1	0	0
11-16	29	1	4	7	41	0	0	0
11-17	20	1	2	7	30	1	0	0
11-18	23	1	1	10	35	0	0	0
合计	270	1 1 2 3	343	128	1864	37	5	6

3.2 频谱特征

为了解"海马"冷泉区冷泉活动产生的微地震 信号的频谱特征,对拾取的冷泉活动微地震信号进 行了频谱分析和时频分析,由于大多数事件在水听 器分量上无明显的响应,本研究仅对海底地震仪的 E、N、Z三分量进行分析。通过快速傅里叶变换计 算得到振幅谱,了解其主频特征;利用连续小波变 换的时频分析掌握信号的时域信息和频域信息,以 了解信号的频率随着时间变化的规律。图 6 为 图 5 中的 3 个冷泉活动微地震信号频谱图和时频 图。在 S28 台站中拾取的短扰动信号其 E 分量和 N分量主频在13 Hz 附近, Z分量主频约在25 Hz 附 近;在 S16台站中拾取的冷泉微地震信号其 E分 量、N分量和Z分量、主频约在 5~8 Hz 附近;在 Gorpro 台站中拾取的 E分量主频约在 16 Hz 附近, N 分量和 Z 分量主频约在 7~10 Hz 附近。3 个冷泉 活动E、N、Z分量上微地震信号优势频率能量集中 在各自频谱图中主频峰值附近,在时间上与冷泉微 地震事件发生时间匹配,优势频率与各自冷泉微地 震事件相对应。

本研究还统计出了两组观测数据中拾取的、与



图 5 冷泉活动微地震信号波形特征







Fig.6 The spectra and spectrogram of microseismic cold-seep activity

冷泉活动相关的微地震事件的主频,以进一步了解 "海马"冷泉区冷泉微地震事件主频分布特征。对 于 2014年的观测数据,每一台站选取了一个同时 被3个分量拾取到的冷泉微地震事件,对于2021年 的观测数据,选取了所有同时被3个分量拾取到冷 泉微地震事件,其微地震事件主频分布如图7所 示。可以看到在"海马"冷泉区观测到的冷泉活动 产生的微地震事件主频分布为4~26 Hz,这与已知 的冷泉微地震事件频率特征相符合。

3.3 时间分布特征

冷泉活动产生的微地震事件一般与海底的裂隙、裂缝等通道中流体活动存在关联,但是是否与海洋潮汐涨落存在一定的关系尚不清楚。为了解冷泉活动是否富有周期性出现的规律,我们对两组数据的拾取结果进行了时间统计分析。在2014年的拾取结果中,S20和S32台站存在大量的识别出的冷泉微地震事件,我们以这两个台站为分析对象。两个台站有效记录时间为4月18日01时至4月19日03时,按照一个小时为时间段统计记录期间拾取的冷泉活动微地震事件,统计结果如图 8、9所示。S20台站在4月18日05—08时、

12—17时和18—24时这3个时间段内拾取到的冷 泉微地震事件较多,S20台站在4月18日05—08时 段内拾取到的冷泉微地震事件较多,在4月18日 11—12时和4月19日01—02时短时间段内拾取的 冷泉微地震事件较多。S20和S32台站在4月 18日05—08时间段内均拾取到较多的冷泉微地震 事件,在其他时间段内并没有呈现出明显的同时拾 取较多或较少冷泉微地震事件的规律。整体上观 测时间只有约26h,分析时间仍然较短,并不能明 显地发现冷泉区微地震事件存在富有周期性出现 的规律。

在 2021 年布放海底地震仪进行了相对较长的 观测试验,有效记录时间从 11 月 6 日 15 时—11 月 18 日 24 时,采用长短时窗能量比方法共对 13 d 的 海底地震仪记录数据进行了冷泉微地震事件的识 别。选取了 11 月 7 日 0 时—11 月 18 日 24 时 12 d



图 7 两次观测实验中与冷泉活动相关的微地震事件主频分布图





图 8 S20 台站不同时间段内 E、N、Z 三分量拾取的冷泉微地震事件统计直方图

Fig.8 The statistical histogram of cold-seep microseismic events picked by the *E*, *N*, and *Z* components at the S20 station during different

完整 24 h 的拾取结果,并按照 1 个小时的时间段划 分统计每天每 1 h 内拾取的冷泉活动微地震事件数 量,发现 Gorpro 台站中较多时间段并没有拾取到冷 泉微地震活动,进一步统计出 Gorpro 台站中 12 天 中每天冷泉微地震事件发生频次最多的时间段。 2021年11月7—18 日 Gorpro 台站四分量每天拾取 出最多次冷泉微地震事件的时间段折线图,如 图 10 所示,可以看到折线图起伏变化较大,这就意 味着 12 d 中冷泉微地震事件的发生时间段不是固 定的,不存在随时间周期变化的规律性,随机性较强,初步判断"海马"冷泉区微地震活动可能并不受 潮汐变化影响。

4 讨论

海底天然气气源运移疏导通道在水合物成藏 过程中起关键作用,很大程度上直接决定着水合物 的分布与规模^[4445]。在冷泉活动活跃区,含气流体









图 10 Geopro 台站 2021 年 11 月 7—18 日期间每日拾取最多次冷泉微地震事件的时间段折线图

Fig.10 The temporal line chart of the period with the most cold-seep microseismic events picked up each day at the Geopro station from November 7 to November 18, 2021

运移流体逸散活动较为频繁,由此产生大量的甲烷 气泡在沉积层中以弹性膨胀和拉伸断裂交替循环 的方式生长,会导致沉积物的破裂和变形,从而引 起一系列不同于常规微地震事件的海底微震动。 本文两组不同时间段、观测周期的监测数据中拾取 的微地震事件与已有的冷泉区海底地震仪记录中 短时微地震事件类似,可以断定这些微地震事件是 由天然气水合物区中含气流体运移过程产生的,进 一步可以推测"海马"冷泉区的冷泉流体逸散活动 十分活跃,呈现出集中性、无规律性状态,产生的微 地震信号波形特征十分明显,持续时间较短、能量 不强、频率峰值一般为4~26 Hz。

本文两次观测试验数据中拾取得到大量冷泉 活动微地震事件,得到"海马"冷泉区天然气水合物 区冷泉活动微地震响应特征。然而,在2014年多台 海底地震仪观测实验中数据记录时长较短,并且观 测系统也是针对主动源监测设计,不能满足进一步 的微地震震源定位的要求。2021年中的观测试验 记录时间较长,但是受制于只有1台海底地震仪监 测,对研究冷泉活动规律仍然十分有限。如需深入 剖析冷泉活动流体逸散活动规律,后期针对性在冷 泉喷口附近多角度布设多个海底地震仪进行长周 期的数据采集尤为必要。

5 结论

(1)"海马"冷泉区的冷泉活动产生的微地震事件存在短扰动信号和典型的冷泉微地震信号,信号在波形上尾部像螺丝一样有规律的衰减,波形持续时间为0.3~2s,且仅包含初至波,没有明显的续至波。

(2)频谱分析结果表明在"海马"冷泉区观测到 的冷泉活动产生的微地震事件主频通常为4~26 Hz, 与已知的冷泉微地震事件频率特征相符合。

(3)对 2014年 S20和 S32站位短周期和 2021 年 Gorpro 台站长周期的冷泉活动微地震事件发生 的时间统计分析表明,"海马"冷泉区微地震活动不 存在随时间周期变化的规律性,可能并不受潮汐变 化影响,只是受自身活动强弱的影响。

尽管我们在琼东南海域"海马"冷泉喷口的海 底地震仪中发现了大量的与冷泉活动相关的微地 震信号,能够初步得到一些该区域冷泉活动的规律 特征,但受到海洋观测实验条件和观测数据的限 制,对该区域冷泉活动的深入研究(如冷泉微地震 震源定位、潮汐等固体潮对冷泉微地震活动的影响 以及冷泉喷口通量测算等)仍需要长周期和多手段 的监测。

致谢:感谢广州海洋地质调查局海洋地质勘 查技术方法所提供"海马"冷泉附近海底地震仪数 据上的支持。

参考文献 (References)

- 张金华,方念乔,魏伟,等. 天然气水合物成藏条件与富集控制因素
 [J]. 中国石油勘探, 2018, 23(3): 35-46. [ZHANG Jinghua, FANG Nianqiao, WEI Wei, et al. Accumulation conditions and enrichment controlling factors of natural gas hydrate reservoirs[J]. China Petro-leum Exploration, 2018, 23(3): 35-46.]
- [2] You K, Flemings P B, Malinverno A, et al. Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(4): 1146-1196.
- [3] 万春燕,张贺恩,李磊,等.海洋天然气水合物降压开采装备现状与 技术探讨 [J]. 石油机械, 2024, 52(10): 83-90. [WAN Chunyan, ZHANG He'en, LI Lei, et al. Current status and techniques of equipment for depressurization exploitation of marine gas hydrate[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(10): 83-90.]
- [4] 苏丕波,梁金强,张伟,等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏系统 [J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 77-89. [SU Pibo, LIANG Jinqiang, ZHANG Wei, et al. Natural gas hydrate accumulation system in the Shenhu sea area of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 77-89.]
- [5] 梁金强, 宁伏龙, 张如伟, 等. 海域天然气水合物勘查开发进展及研究方向 [J]. 地质学报, 2024, 98(9): 2533-2540. [LIANG Jinqiang, NING Fulong, ZHANG Ruwei, et al. Progress and research direction of marine natural gas hydrate exploration and development[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(9): 2533-2540.]]
- [6] 邸鹏飞, 冯东, 高立宝, 等. 海底冷泉流体渗漏的原位观测技术及冷泉活动特征 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1592-1602. [DI Pengfei, FENG Dong, GAO Libao, et al. In situ measurement of fluid flow and signatures of seep activity at marine seep sites[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1592-1602.]
- [7] 张锟, 宋海斌, 王宏斌, 等. 南海北部琼东南海域活动冷泉流场特征 初探 [J]. 科学通报, 2020, 65(12): 1130-1140. [ZHANG Kun, SONG Haibin, WANG Hongbin, et al. A preliminary study on the active cold seeps flow field in the Qiongdongnan Sea Area, the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(12): 1130-1140.]
- [8] 刘莉萍,初凤友,郭磊,等.海底天然气水合物及冷泉流体渗漏的原 位观测技术 [J]. 海洋学研究, 2023, 41(1): 26-44. [LIU Liping, CHU Fengyou, GUO Lei, et al. Explorations of marine gas hydrate deposits and the signatures of hydrocarbon venting using in situ techniques[J]. Journal of Marine Sciences, 2023, 41(1): 26-44.]
- [9] 吴能友,杨胜雄,王宏斌,等.南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系 [J].地球物理学报,2009,52(6): 1641-1650.
 [WU Nengyou, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Gas-bear-

ing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, Northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1641-1650.]

- [10] 何家雄,夏斌,孙东山,等.琼东南盆地油气成藏组合、运聚规律与 勘探方向分析 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 53-58. [HE Jiaxiong, XIA Bin, SUN Dongshan, et al. Hydrocarbon accumulation, migration and play targets in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 53-58.]
- [11] 张云山, 贾永刚, 尉建功. 海底冷泉原位观测装置研究回顾与展望 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 200-213. [ZHANG Yunshan, JIA Yonggang, WEI Jiangong. A review and prospect of in-situ observation equipment for cold seep[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 200-213.]
- [12] 吕泰衡,孙治雷,耿威,等.海底冷泉区沉积物-水界面甲烷通量原位观测研究进展 [J].海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 167-180.
 [LV Taiheng, SUN Zhilei, GENG Wei, et al. Progress in in-situ observation of methane flux at sediment-water interface in cold seep[J].
 Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 167-180.]
- [13] 臧虎临,侯贺晟,安美建,等.海域天然地震资料采集方法综述[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2218-2224. [ZANG Hulin, HOU Hesheng, AN Meijian, et al. Seismological data acquisition methods in marine area[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 2218-2224.]
- [14] 魏垚, 牛雄伟, 虞嘉辉, 等. 利用海底地震仪探测碳泄漏的研究进展
 [J]. 地震学报, 2023, 45(3): 392-410. [WEI Yao, NIU Xiongwei, YU Jiahui, et al. Research progress on detection of carbon leakage by ocean bottom seismometer[J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, 45(3): 392-410.]
- [15] Lepore S, Grad M. Analysis of the primary and secondary microseisms in the wavefield of the ambient noise recorded in northern Poland[J]. Acta Geophysica, 2018, 66(5): 915-929.
- [16] Batsi E, Tsang-Hin-Sun E, Klingelhoefer F, et al. Nonseismic signals in the Ocean: indicators of deep sea and seafloor processes on oceanbottom seismometer data[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019, 20(8): 3882-3900.
- [17] Wang Y Z, Yang T, Wu Y C, et al. A new broad-band ocean bottom seismograph and characteristics of the seismic ambient noise on the South China Sea seafloor based on its recordings[J]. Geophysical Journal International, 2022, 230(1): 684-695.
- [18] Ardhuin F, Gualtieri L, Stutzmann E. How ocean waves rock the Earth: two mechanisms explain microseisms with periods 3 to 300 s[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(3): 765-772.
- [19] 刘亚楠, 刘保华, 刘晨光, 等. 南海东部次海盆地震背景噪声分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 109-117. [LIU Ya'nan, LIU Baohua, LIU Chenguang, et al. Research on seismic background noise in the Eastern Subbasin of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(2): 109-117.]
- [20] Kuna V M, Nábělek J L. Seismic crustal imaging using fin whale songs[J]. Science, 2021, 371(6530): 731-735.
- [21] Dréo R, Bouffaut L, Leroy E, et al. Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the Western Indian Ocean[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2019, 161: 132-144.

- [22] Ugalde A, Gaite B, Ruiz M, et al. Seismicity and noise recorded by passive seismic monitoring of drilling operations offshore the Eastern Canary Islands[J]. Seismological Research Letters, 2019, 90(4): 1565-1576.
- [23] 段旻良, 童思友, 陈江欣, 等. 海底流体逃逸活动的地球物理响应特征 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 2002-2015. [DUAN Minliang, TONG Siyou, CHEN Jiangxin, et al. Geophysical characteristics of seabed fluid escape[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 2002-2015.]
- [24] 栾锡武,李晓芸. 流体迁移和海底地形与天然气水合物的形成 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 1-10. [LUAN Xiwu, LI Xiaoyun. Sea floor topography of shallow gas hydrate area: data from okhotsk sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(2): 1-10.]
- [25] Pontoise B, Hello Y. Monochromatic infra-sound waves recorded offshore Ecuador: possible evidence of methane release[J]. Terra Nova, 2002, 14(6): 425-435.
- [26] Tary J B, Géli L, Guennou C, et al. Microevents produced by gas migration and expulsion at the seabed: a study based on sea bottom recordings from the Sea of Marmara[J]. Geophysical Journal International, 2012, 190(2): 993-1007.
- [27] Tsang-Hin-Sun E, Batsi E, Klingelhoefer F, et al. Spatial and temporal dynamics of gas-related processes in the Sea of Marmara monitored with ocean bottom seismometers[J]. Geophysical Journal International, 2019, 216(3): 1989-2003.
- [28] Sultan N, Riboulot V, Ker S, et al. Dynamics of fault-fluid-hydrate system around a shale-cored anticline in deepwater Nigeria[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116(B12): B12110.
- [29] Franek P, Plaza-Faverola A, Mienert J, et al. Microseismicity linked to gas migration and leakage on the western Svalbard shelf[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2017, 18(12): 4623-4645.
- [30] 朱俊江, 李三忠, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域地质环境综合调查 及科学意义 [J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1416-1426. [ZHU Junjiang, LI Sanzhong, LU Jing'an, et al. Scientific implications and preliminary surveying results of geological and physical oceanography environment in the Shenhu Area of the northern South China Sea[J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1416-1426.]
- [31] Wang X C, Nie B, Wu Z Y, et al. Identification and characteristics analysis of micro-seismic signals in the Haima Seep Area[J]. Journal of Earth Science, 2024, 35(1): 288-291.
- [32] Liu B, Huang J Y, Jiang W B, et al. Seismic monitoring of sub-seafloor fluid processes in the [36]Haima cold seep area using an Ocean Bottom Seismometer (OBS)[J]. Earth and Planetary Physics, 2023, 7(5): 582-602.
- [33] 王宜志,杨挺,刘晨光,等.中国南海西北次海盆海底地震记录的短时事件分析 [J]. 地震学报, 2023, 45(3): 431-444. [WANG Yizhi, YANG Ting, LIU Chenguang, et al. Short duration events on OBS recordings in the Northwest Sub-basin of the South China Sea[J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, 45(3): 431-444.]
- [34] 刘晨光, 华清峰, 裴彦良, 等. 南海海底天然地震台阵观测实验及其 数据质量分析 [J]. 科学通报, 2014, 59(16): 1542-1552. [LIU Chenguang, HUA Qingfeng, PEI Yanliang, et al. Passive-source Ocean Bot-

tom Seismograph (OBS) array experiment in South China Sea and data quality analyses[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(16): 1542-1552.]

- [35] 孙国静,管红香,张志顺,等.南海海马冷泉区沉积物孔隙水地球化 学特征对冷泉活动的指示 [J].海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 1-14. [SUN Guojing, GUAN Hongxiang, ZHANG Zhishun, et al. Geochemical characteristics of sediment pore water in Haima area of the South China Sea: an indication of cold seeps[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 1-14.]
- [36] Huang Y Y, Feng J C, Xie Y, et al. Phase equilibrium characteristics of natural gas hydrate formation at the deep-water environment of "Haima" cold seep[J]. Energy Reports, 2022, 8: 5501-5509.
- [37] 赵静,梁前勇,尉建功,等.南海北部陆坡西部海域"海马"冷泉甲烷 渗漏及其海底表征 [J]. 地球化学, 2020, 49(1): 108-118. [ZHAO Jing, LIANG Qianyong, WEI Jiangong, et al. Seafloor geology and geochemistry characteristic of methane seepage of the "Haima" cold seep, northwestern slope of the South China Sea[J]. Geochimica, 2020, 49(1): 108-118.]
- [38] Feng J X, Yang S X, Wang H B, et al. Methane source and turnover in the shallow sediments to the west of Haima cold seeps on the northwestern slope of the South China Sea[J]. Geofluids, 2019, 2019: 1010824.
- [39] 杨力, 刘斌, 徐梦婕, 等. 南海北部琼东南海域活动冷泉特征及形成 模式 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2905-2914. [YANG Li, LIU Bin, XU Mengjie, et al. Characteristics of active cold seepages in Qiongdongnan Sea area of the northern South China Sea[J]. Chinese

Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 2905-2914.]

- [40] 赵文宇, 童思友, 陈江欣, 等. 海底冷泉羽状流及其资源效应探讨 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2251-2263. [ZHAO Wenyu, TONG Siyou, CHEN Jiangxin, et al. Discussion on the submarine bubble plume and its effect on hydrocarbon resources[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2251-2263.]
- [41] Stevenson P R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(1): 61-80.
- [42] Allen R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 68(5): 1521-1532.
- [43] Earle P S, Shearer P M. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(2): 366-376.
- [44] 杨胜雄,梁金强,陆敬安,等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏 特征及主控因素新认识 [J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14. [YANG Shengxiong, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-14.]
- [45] 雷裕红, 宋颖睿, 张立宽, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展及发展方向 [J]. 石油学报, 2021, 42(6): 801-820. [LEI Yuhong, SONG Yingrui, ZHANG Likuan, et al. Research progress and development direction of reservoir-forming system of marine gas hydrates[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(6): 801-820.]