

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019070602

# 冲绳海槽中部海底气体排放分布特征及其控制因素

李昂<sup>1,2</sup>, 蔡峰<sup>1,2</sup>, 吴能友<sup>1,2</sup>, 李清<sup>1,2</sup>, 闫桂京<sup>1,2</sup>, 孙运宝<sup>1,2</sup>, 董刚<sup>1,2</sup>, 骆迪<sup>1,2</sup>

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 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, 青岛 266071

**摘要:**海底气体排放是海洋环境中碳物质从岩石圈进入到水圈中的重要地质过程, 理解甲烷在该过程中的迁移方式和表征是定量评价海底甲烷排放在全球碳循环中环境效应的重要基础。本次研究使用2013—2016年采集的多波束回声测深以及二维多道地震数据, 展示了与海底气体排放有关的地球物理特征, 在水体、浅部地层中以及海底界面处分别识别出了束状羽状流、柱状裂隙气体疏导通道和下伏有碳酸盐岩的海床凸起, 它们被解释为气体排放的地质表征, 这些构成要素在空间上的叠置关系呈现了冲绳海槽中部气体排放特征, 研究选取典型实例刻画了这一地质过程并总结了模型。经过分析断层与气体排放地质表征的空间位置关系, 提出冲绳海槽研究区内海底气体排放的分布受到了盆地构造活动的控制, 冲绳海槽发生的斜向裂谷作用导致了研究区张扭断层的形成, 以拉张为主的断层为富甲烷流体提供了垂向运移通道, 致使气体排放沿正断层分布。研究表明海底气体排放可以广泛发育在以拉张应力为主的地质环境中。

**关键词:** 气体排放; 构造控制; 气体羽状流; 冲绳海槽

中图分类号: P738 文献标识码: A

## Distribution of the gas vents at the seabed of the Mid-Okinawa Trough and their controlling factors

LI Ang<sup>1,2</sup>, CAI Feng<sup>1,2</sup>, WU Nengyou<sup>1,2</sup>, LI Qing<sup>1,2</sup>, YAN Guijing<sup>1,2</sup>, SUN Yunbao<sup>1,2</sup>, DONG Gang<sup>1,2</sup>, LUO Di<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Gas venting at the seabed is recognized as a key geological process for carbon transfer from the lithosphere to hydrosphere. Understanding how methane is transported and the geological expressions in this process is necessary for quantitatively evaluating its climatic impact on global carbon cycle. In this study, multi-beam echo-sounder (MBES) and multi-channel seismic (MCS) data acquired between 2013 and 2016 from the Mid-Okinawa Trough are used to show the geophysical features associated with gas vents. We identified the bundle-shaped gas flares in water column, the migration pathways consisting of cylindrical cluster of fractures in the shallow subsurface and the seabed domes underlain by carbonate-cemented sediments. They are regarded hereby as the geological indicators of gas vents, indicating how gases are vented in the Mid-Okinawa Trough. An example has been selected for description to represent the gas vents in the study area. We proposed that the distribution of gas vents in the study area is controlled by basin-scale tectonic activities after analyzing their spatial relationship with the faults. The oblique rifting in the Mid-Okinawa Trough resulted in the formation of the transtensional faults. The faults that formed in the tensile regime provide vertical conduits for gas-rich pore fluids to migrate, which caused that the gas vents were elongated along the normal faults. This study suggests that gas vents on the seabed can occur extensively in the extension-dominated tectonic regime.

**Key words:** gas vent; tectonic control; gas flare; Okinawa Trough

气体排放 (gas vents) 广泛分布在海洋环境中, 该地质过程可以将碳物质从沉积物转移到海水中<sup>[1]</sup>。通常来讲, 浅表层海相沉积物对于向上运移的气体

(主要是甲烷) 是一种有效的屏障。该效果体现在物理和化学两个方面: 近海底沉积物通常岩性较为均一, 垂向渗透率较差, 对于下伏游离气体可以形

资助项目: 山东省自然科学基金“冲绳海槽北部泥火山地球物理定量表征及其活动控制因素分析”(ZR201807100270); 中国博士后科学基金项目“陆架边缘三角洲沉积构架定量表征及其演化模式探讨”(2018M630762); 国家重点研发计划“冷泉系统发育的地质条件及控制作用”(2018YFC0310001); 国际博士后交流计划引进项目

作者简介: 李昂(1987—), 男, 博士后, 主要从事天然气水合物成藏机理、甲烷渗漏及深海沉积研究工作, E-mail: ang.li\_cn@outlook.com

通讯作者: 蔡峰(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质与天然气水合物方面的研究工作, E-mail: caifeng0532@163.com

收稿日期: 2019-07-06; 改回日期: 2019-08-16. 蔡秋蓉编辑

成物理封闭<sup>[2-3]</sup>。此外,海底附近的甲烷会被微生物通过甲烷厌氧氧化反应(AOM)大量消耗,从而难以进入到海水中<sup>[4-6]</sup>。然而,该屏障是可以被突破的,当沉积物孔隙压力增大至静岩压力时裂隙便会形成,富含游离气体的超压孔隙流体将会优先通过这些裂隙向上快速运移直至进入到海水中<sup>[7]</sup>。甲烷在海水中溶解会导致二氧化碳的生成以及随后的海水酸化和缺氧<sup>[8-9]</sup>。小部分排出的甲烷可能会形成羽状流(gas flare)甚至可以进入到大气当中,由于甲烷是一种有效的温室效应气体,该过程可能会加剧温室效应<sup>[10]</sup>。但是,定量评价这一过程在全球气候变化中的效果较为困难,这是由于尚不清楚海洋环境中有多少甲烷从沉积物中逃逸并进入到大气中<sup>[11]</sup>。

海底气体排放的地质表征会随着排放强度和时间的变化,形成的海底地貌特征包括泥火山(mud volcano)、泥流(mud flow)、小丘(pingo)、海底凸起(seabed dome)、麻坑(pockmark)和碳酸盐岩(carbonate buildup)<sup>[12-13]</sup>。它们可以以不同的组合同时出现在同一个地方且互相叠加<sup>[14]</sup>,它们的存在指示了甲烷排放,这些甲烷逃逸是碳物质进入到海水中的重要组成部分<sup>[15-16]</sup>。气体排放在地震数据中通常呈现为气烟囱(gas chimney),其地震剖面特征是圆柱状的异常声学带,其中通常伴随着反射层的上拱和下凹以及局部震幅异常<sup>[17-18]</sup>。气烟囱的高度通常有数百米,最大高度可达约1 km<sup>[19]</sup>。

本次研究使用了多波束回声测深(MBES)数据以及二维多道地震(MCS)数据,揭示了2013—2016年冲绳海槽中部部分海底发育有气体排放,分析了盆地构造活动及断层作用对于气体排放分布的控制,海底气体排放和断层分布的空间位置关系说明海底气体排放可以广泛出现在以拉张应力为主的深海环境中。

## 1 区域地质背景

冲绳海槽是位于中国东海的早期弧后盆地,其延伸方向基本平行于琉球岛弧<sup>[20]</sup>(图1)。冲绳海槽南起于宜兰平原,北止于九州岛,盆地水深向东北方向逐渐减小,最小值可达约200 m(图1)。冲绳海槽宽度从南部的60~100 km向北增加至约230 km,这一宽度变化是由于冲绳板块绕着台湾北部极点产生顺时针旋转的构造运动所导致<sup>[21]</sup>。自中新世以来,菲律宾海板块向欧亚板块之下的俯冲导致了上驮板块岩石圈的拉伸,从而在弧后位置形成了冲绳海槽,持续的俯冲作用造成了冲绳海槽晚中新世

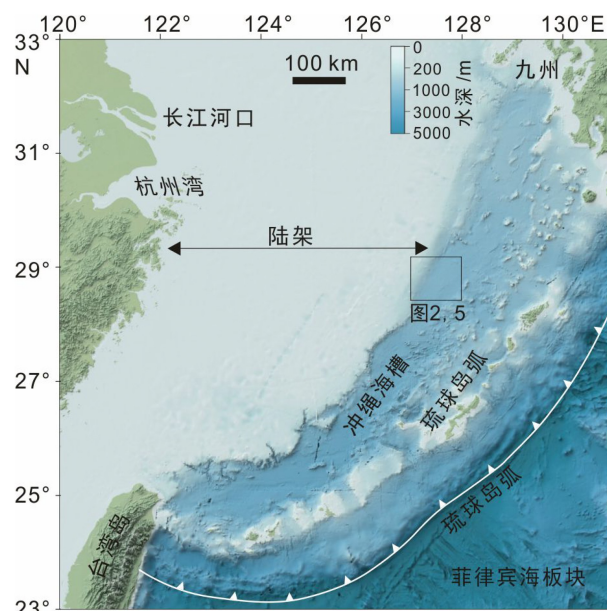


图1 冲绳海槽弧后盆地位置图

底图数据来源于美国国家海洋和大气管理局数据库。

Fig.1 The location map of the back-arc basin of the Okinawa Trough

the bathymetric data are from the database of the National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA.

和早更新世的断陷作用<sup>[22-25]</sup>。自上新世以来冲绳海槽受到右旋张扭作用的影响,该作用源于南海板块向北-北北东方向运动的挤压<sup>[26]</sup>。当前冲绳海槽发育两组断裂系统,一是平行于海槽延伸方向的平行断裂系,二是斜交或正交于海槽走向的横切断裂系,其北部有一系列雁列状地堑和半地堑<sup>[27-28]</sup>。冲绳海槽的平均热流量为 $3.34 \pm 2.75$  HFU,该数值高于其他西北太平洋边缘盆地热流量<sup>[29-31]</sup>。在冲绳海槽北部,海底火山分布于盆地东部,平行于陆坡走向<sup>[32-33]</sup>。重力取样表明冲绳海槽更新世—全新世沉积物主要类型包括半深海软泥、凝灰软泥、浊流沉积物和生物碎屑灰岩<sup>[20]</sup>。

冲绳海槽发育有甲烷和二氧化碳流体排放,其中前者出现在宫古段西部槽底附近,地震剖面中异常声学现象指示了直径约2.2 km的海底气泉<sup>[34]</sup>。在JADE热液活动区两个地点曾观察到富含二氧化碳流体排放,浅层沉积物中气泡通过上覆固结沉积物中的断裂向上运移至海底,之后在海床上形成约10 cm长、由水合物包裹的中空运移通道,气泡最终通过该通道进入海水当中<sup>[35]</sup>。重力取样中孔隙水地化数据表明冲绳海槽中部西坡泥火山周缘存在有溶解态甲烷渗漏<sup>[36-37]</sup>。冲绳海槽北部和中部外陆架和陆坡上部也发育有泥火山,它们是由于富含气体的孔隙流体通过正断层向上运移至海底所形成<sup>[38]</sup>。

海底声学成像显示后向散射局部数值较高,这些异常高值可能来源于向上运移的气泡、生物构造和碳酸盐岩胶结的沉积物<sup>[38]</sup>。

## 2 方法

本次研究中数据是使用康斯贝格 EM122 船载深水多波束系统采集,由东方红 2 号(2013—2015 年)和海大号(2016 年)4 个航次实施,该系统可以发射和接收  $1^\circ \times 1^\circ$  的波束,工作频率 12 kHz,双条幅模式下可发射波束 864 个,水深测量误差  $\pm 0.2\%$ 。水体声速剖面是通过使用声速剖面仪(SVP)和抛弃式温盐深仪(X-CTD)获取。多波束数据、船体航迹数据和水体声速剖面汇总到 QPS Qimera 软件进行处理, Qimera 和 Fledermaus 软件分别用来在扇面和三维空间中观察羽状流。海底地貌和后向散射强度分别使用 Qimera 和 FMGeocoder 软件进行处理和成像。地震数据使用法国 SIG L5 电火花震源采集,频率为 20~1 000 Hz,地震数据接收采用 48 个通道数字缆,总长 294 m,采样间隔为 0.5 ms,采集的数据随后使用 ProMAX 系统进行现场处理,处理步骤包括预滤波、反褶积、震幅回复、速度分析、动校正、叠加、去噪等。主测线间隔为 8 km 且覆盖深水盆

地,大部分主测线终止于陆架边缘附近。二维多道地震的穿深最高可达约 400 ms(双程时差),剖面中海底多次波对于数据观察的干扰较为严重。本次研究将综合使用多波束和地震数据分析海床凸起几何形态、海水中羽状流声学特征以及浅层沉积物中气体的垂向运移。

## 3 结果及解释

### 3.1 海床地貌及后向散射特征

研究区内海床地貌特征包括断层崖和海床凸起(图 2)。断层崖在多波束海底地貌数据和多道地震剖面中均可以识别,两者可以交叉验证说明断层的分布模式,海床断层崖集中分布在外陆架—陆坡环境中,总体走向为北东-南西,向深盆方向逐渐过渡为北东东-南西西(图 2)。在陆坡附近断距较大,向深盆方向逐渐减小,以至于部分断层崖无法在海床地貌图中肉眼识别出来(图 2)。海床凸起位于海槽西坡底部附近,在高分辨率多波束海底数据中可识别出 72 个,水深范围为 843~1 050 m。这些凸起具有似圆形、似椭圆形的平面形态,长轴长度范围为 95~659 m,凸起高度为 1.3~20.9 m(图 3),侧翼

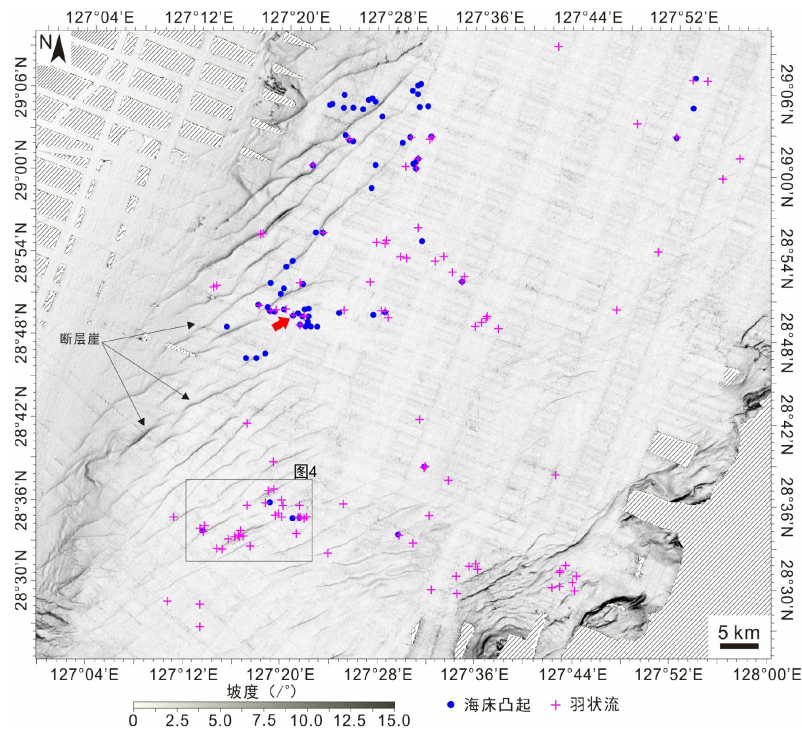


图 2 研究区海底坡度图

红色箭头指示了图 6 和图 7 中气体排放地质模型的位置,更多细节见图 6 和图 7。

Fig.2 The map of the seabed slope

The red arrow marks the location of the geological model of gas venting in Fig. 6 and Fig. 7, respectively. More details are shown in Fig. 6 and Fig. 7.

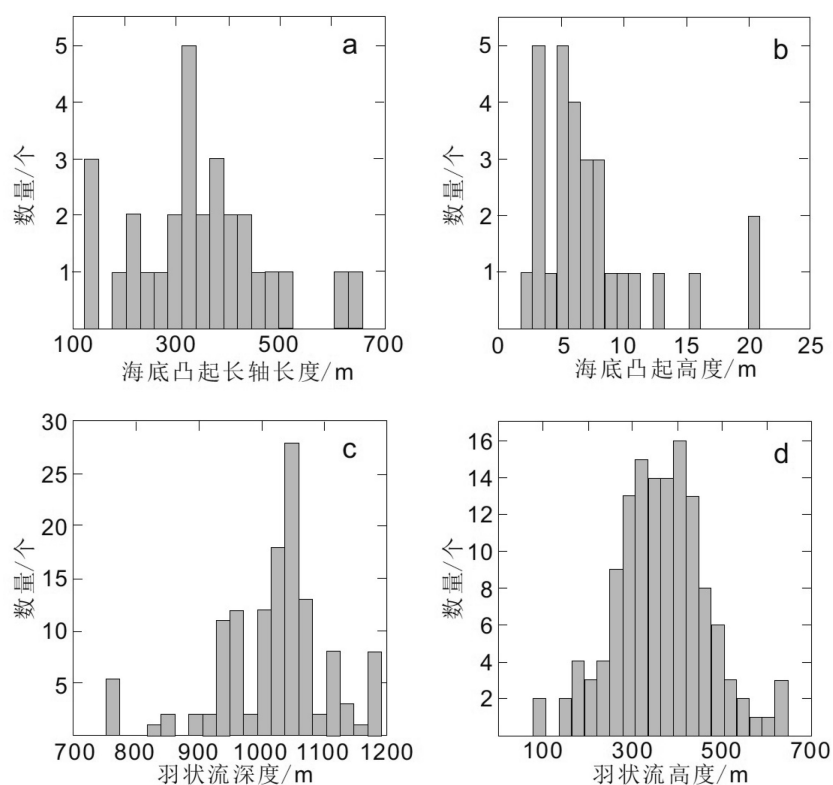


图 3 海底凸起长轴长度 (a) 和高度直方图 (b) 及羽状流深度 (c) 和高度直方图 (d)

Fig.3 Histograms of the long-axis length(a) and the height of the seabed domes(b), histograms of the depth (c)and the height of the gas flares(d)

坡度为  $0.7^{\circ}\sim 12.5^{\circ}$ , 平均坡度为  $3.2^{\circ}$ 。凸起的几何形态和世界上已知的深海泥火山相似, 但规模较小 (例如中建南盆地<sup>[39]</sup>)。引起海底发生局部凸起有如下 4 种机理: ①海底之下液化泥质沉积物随着超压孔隙流体向上运移至海底, 进入水体时流体动力环境发生改变, 卸下的沉积物不断堆积形成类似于火山外形的沉积体<sup>[40]</sup>; ②向上运移的富甲烷流体运移至海底附近时形成甲烷水合物, 孔隙流体从气/液相向固相转变的过程中会伴随有体积增大, 从而导致海底向上发生凸起<sup>[41]</sup>; ③运移至海底附近的游离气会在海底下部聚集形成连续的垂向气柱, 产生的浮力会导致海底附近沉积物向上凸起<sup>[42]</sup>; ④在甲烷渗漏海底附近会有碳酸盐岩通过甲烷厌氧氧化作用形成, 在该处有时可以形成碳酸盐岩丘和/或礁的正地形<sup>[43]</sup>。

声学成像显示海底存在有多处高亮后向散射区域, 这些区域平面上为似椭圆形或不规律几何外形, 局部会合并到一起从而形成一个较大的区域 (图 4)。从平面上看, 高亮后向散射区域分布于断块之上, 或沿着断层崖分布 (图 4), 最大面积可达  $0.44 \text{ km}^2$  (位于  $28^{\circ}35'34.8491''\text{N}$ 、 $127^{\circ}17'12.3909''\text{E}$ )。这些高亮后向散射区域的出现通常被解释为源于海

底附近的天然气水合物和/或自生碳酸盐岩, 该两者均能产生高于周围地层的波阻抗, 且是富甲烷孔隙流体在海底附近发生的物理和化学反应的产物<sup>[13]</sup>。共有 45 处高亮后向散射区域与海床凸起相吻合, 地震剖面显示海床凸起之下是垂向并行排列的不连续反射层, 这些反射层比周围反射层震幅低, 通常会向上凸起, 有时会呈现空白反射。

### 3.2 水体声学特征

使用多波束声学水体数据识别出的气体羽状流需要符合下述条件: ①水体异常声学带需要与海底相连; ②羽状流在形态上是孤立的、异常高后向散射强度的垂向叠加; ③异常声学带中后向散射强度需要随着水深变浅而降低<sup>[1]</sup>。多波束数据显示在研究区海底以上附近存在有 129 处异常声学带 (位置如图 5 所示), 通过上述标准分析该异常声学带均存在有气体羽状流。气体羽状流在多波束声学水体数据中通常显示为倾斜的或弯曲的束状高后向散射强度集合, 它们的出现显示了研究区域海底在 2013—2016 年期间普遍发育有气体泄露。识别出的羽状流根部水深为  $750.5\sim 1\,192.1 \text{ m}$ , 高度为  $77.7\sim 647.4 \text{ m}$  (最高羽状流位于  $28^{\circ}31'31.7500''\text{N}$ 、

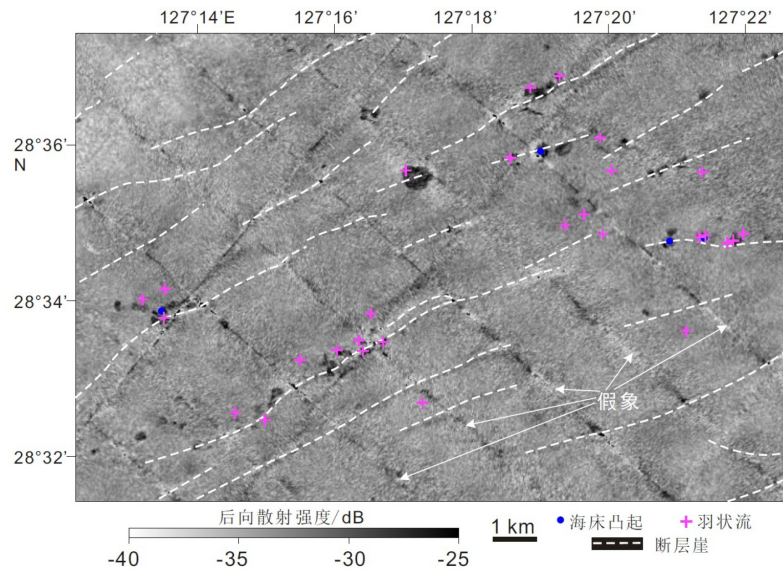


图4 海底后向散射强度放大图

Fig.4 Zoom-in figure of the backscattering intensity of the seabed

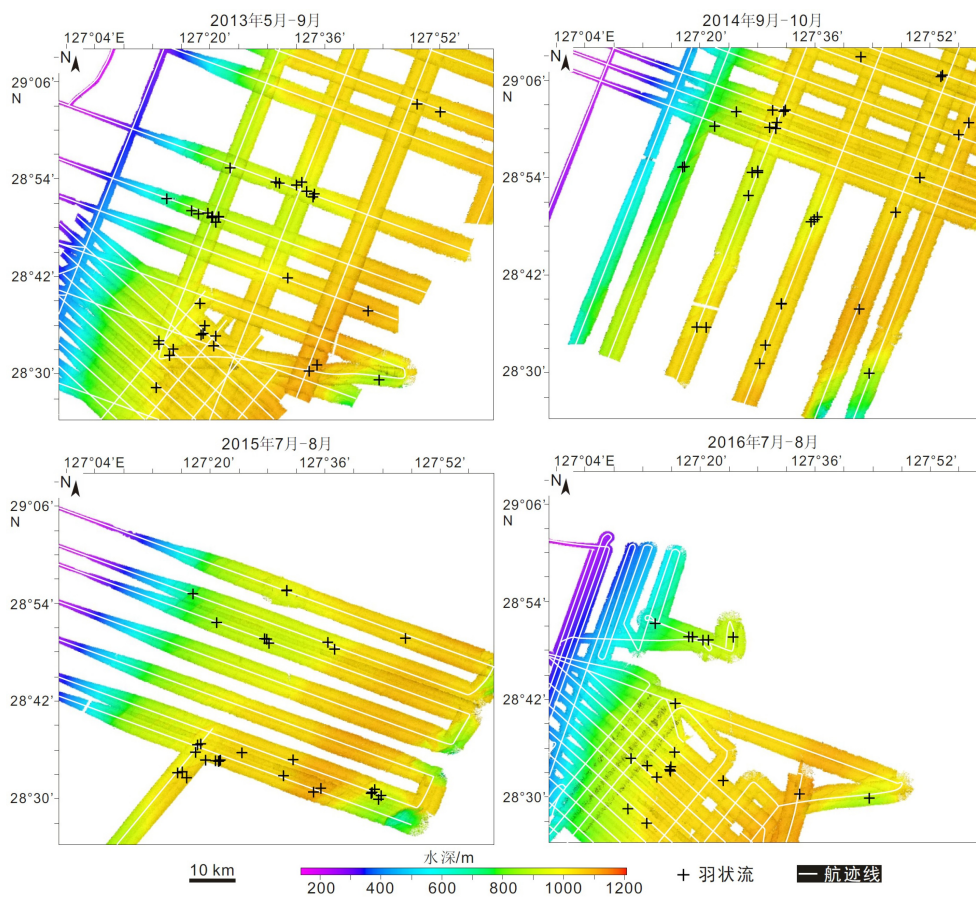


图5 多波束回声测深数据覆盖图与羽状流分布位置图

Fig.5 Bathymetric map derived from multi-beam echo-sounder data and the location map of the gas flares

127°35'26.9500"E), 部分羽状流根部位于海底高亮后向散射区域中, 顶部终止于水深 394.5~937.6 m 处, 该深度可能代表了气体溶解入水中、气泡消失的深度。大部分羽状流沿着北东-南西方向延伸的

断层分布, 或集中在海床凸起的最高点和翼部。分别有 34 和 73 处羽状流与海底凸起和高亮后向散射区域相吻合。

### 3.3 实例

为了展示不同声学数据在空间中的配置关系, 在研究区中选取一处实例加以描述(位置如图 2 红色箭头所示, 位于 28°49'33.1073"N、127°20'41.5494"E), 从而刻画研究区中气体排放的地质表征和模型。如图 6 和图 7 所示, 该气体排放自上而下具有气体羽状流—海底凸起—碳酸盐岩—柱状运移通道的构成要素, 各个要素均是气体从沉积物中向海洋浅层乃至大气圈迁移这一地质过程在不同空间位置的地质表征。该处气体排放水深 939 m, 地震剖面相切于该海底凸起外缘, 海底凸起最高处距该剖面约 121 m, 地震剖面显示海底下部具有柱状的异常声学带, 宽度约 600 m, 根部难以识别, 推测其高度至少为 240 ms(约 216 m), 地震反射特征具体表现为上拱反射层的垂向叠加, 并在海底下 80 ms(约 72 m 处)伴有局部的异常高震幅, 该震幅特征沿固定的反射层向两侧延伸(图 6d)。海底凸起具有近似圆锥形的表征, 高度约 8.5 m, 长轴宽度约 156.2 m, 其凸起部分基本都被高亮后向散射区域覆盖(图 6c), 这是由于海底附近含水合物或/和碳酸盐岩胶结沉积物较周围沉积物与水体产生了更高的波阻抗差异。水体声学数据显示该凸起在 2013 年 9 月和 2016

年 7 月分别发育有 5 和 4 处羽状流, 在两个时间段中气体羽状流喷出位置和倾向皆不相同(图 8), 其中 2013 年羽状流总体上呈树枝状, 高度为 250~380 m, 2016 年羽状流向北倾斜, 高度为 256~315 m(图 8)。气体羽状流随着时间在空间上发生改变是由于海底附近沉积物物性发生改变造成的, 海底凸起处甲烷和水会在较短时间内形成甲烷水合物从而堵塞沉积物孔隙, 产生封闭效应, 下伏游离气会发生侧向运移, 从而在凸起翼部发生泄漏。此外, 这种封闭效应也可能来源于甲烷在浅表层沉积物中发生的厌氧氧化反应, 生成的碳酸氢根会导致自生碳酸盐岩胶结的形成<sup>[44]</sup>。

冲绳海槽深海环境中甲烷为混合成因<sup>[45]</sup>, 来自深部地层(>1 km)热解成因的甲烷游离气可以在浮力作用下通过沉积物孔隙和喉道以及垂向渗透率较高的断层向上运移至浅部地层, 在该运移路径中遇到盖层时便会形成气藏, 同时浅部地层中生物成因的甲烷也会汇入到该气藏当中。随着气藏厚度的不断增加, 气藏顶部沉积物孔隙压力会不断增大直至上覆沉积物中出现垂向裂隙从而形成疏导通道<sup>[46-47]</sup>, 富含甲烷的孔隙流体便会沿着该通道迅速疏导至海水中。随着气体的释放孔隙压力会逐渐下降, 直至游离气无法克服毛细管封闭从而导致

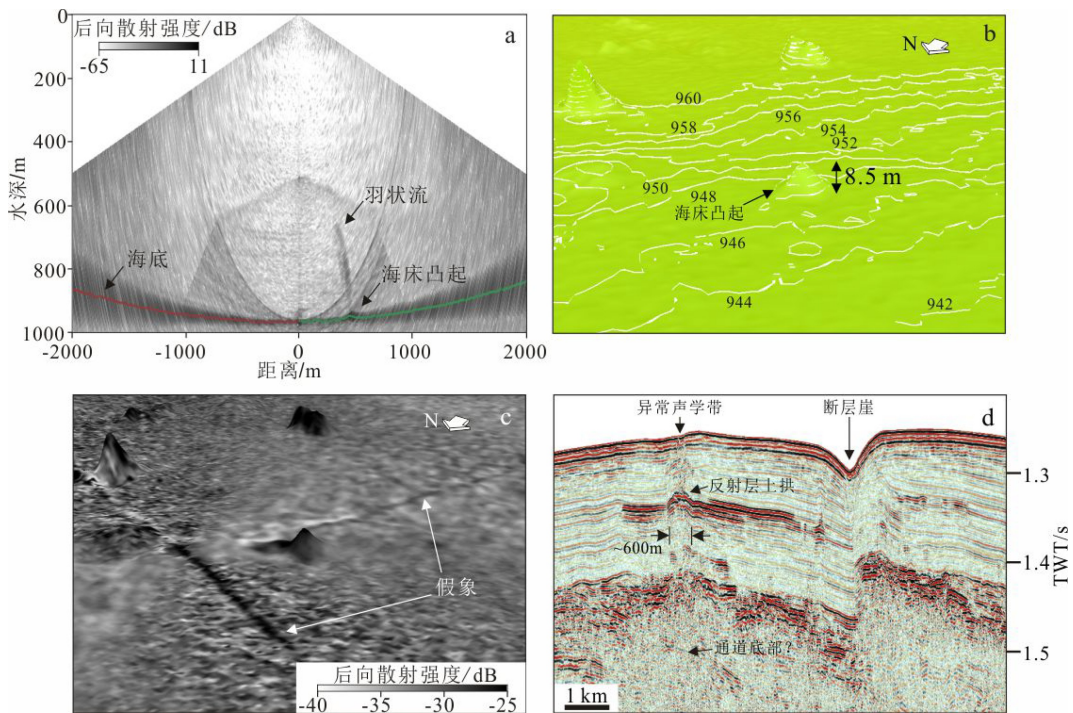


图 6 冲绳海槽中部海底气体排放地质表征

a. 羽状流, b, c. 具有高后向散射强度的海底凸起, d 裂隙疏导通道。

Fig.6 Geological expressions of gas venting from the seabed in the Mid-Okinawa Trough

a. gas flare, b, c. seabed domes having a high-backscattering intensity and d vertical migration conduits consisting of fractures.

甲烷运移的暂时停止。在海底排出的甲烷游离气会在海水中形成孤立的气泡或串状的气泡流,在上升过程中甲烷会不断地溶入到周围水体中,同时会有氮气和氧气进入到气泡中<sup>[48]</sup>。

## 4 讨论

图2表明大部分海底凸起和气体羽状流在空间上与断层具有较好的吻合关系。此外,海底后向散射数据也表明高亮区域基本上沿断层分布(例如图4),可以看出,气体排放的不同地质表征在冲绳

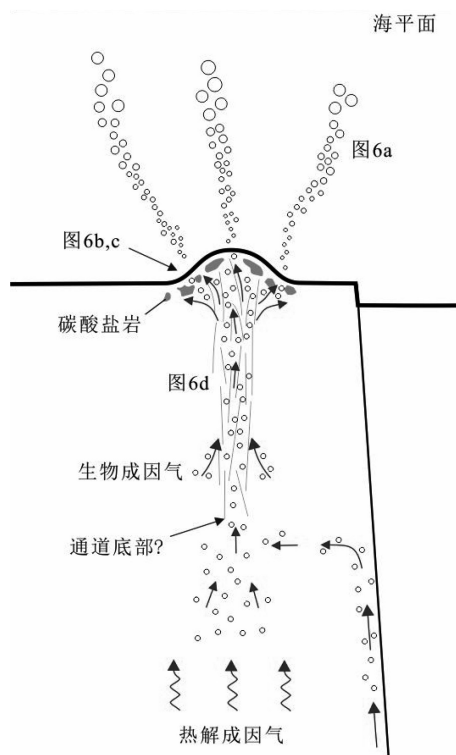


图7 冲绳海槽中部海底气体排放地质模式图

Fig.7 Geological model of gas venting from the seabed in the Mid-Okinawa Trough

海槽研究区内均与断层活动有关。之前研究表明,冲绳海槽作为早期弧后盆地,其构造主应力主要是来源于盆地自中新世以来的断陷和拉伸作用。此外,冲绳海槽还受到少许走滑作用的影响,导致研究区内北东-南西走向断层的性质为张扭断层<sup>[26,49]</sup>。海底断层崖的走向从陆坡附近的北东-南西向深盆方向逐渐过渡为北东东-南西西,在深盆处地层受到走滑作用影响较小,平面上垂直于该处附近断层走向的方向代表了盆地主应力方向,该方向与Fabbri等研究结果一致<sup>[28]</sup>。断层崖走向变化以及略微向盆地外侧凸起的平面形态均与斜向裂谷作用(oblique rifting)物理模拟结果一致<sup>[50]</sup>,这表明研究区内断层模式很可能是斜向裂谷作用的结果。综上所述,笔者认为研究区内气体排放受到了盆地构造运动的控制作用。

研究区内气体排放形成机制不同于挤压和剪切应力背景下泥火山活动和甲烷渗漏(methane seepage),这两种情景中区域规模的挤压和剪切应力作用于低渗透率岩层,均会造成孔隙流体压力高于该深度静水压力,当孔隙流体压力到达临界值时会在上覆地层形成裂隙,孔隙流体会随着液化沉积物运移至海底<sup>[47,51-52]</sup>。在冲绳海槽中部,拉伸断层作用本身无法使孔隙压力升高,然而,形成的断层可以为深部地层中孔隙流体提供运移通道,断层面附近被改造的沉积物可能会具有较大的孔隙和喉道,高压孔隙流体更容易克服毛细管封闭发生运移<sup>[53]</sup>。在拉伸和剪切作用共同作用时,甲烷排放更容易出现在拉伸应力影响的区域中<sup>[54]</sup>。

## 5 结论

(1)2013—2016年期间冲绳海槽中部海域的部分海底发现有多处气体排放,该地质作用通过如下

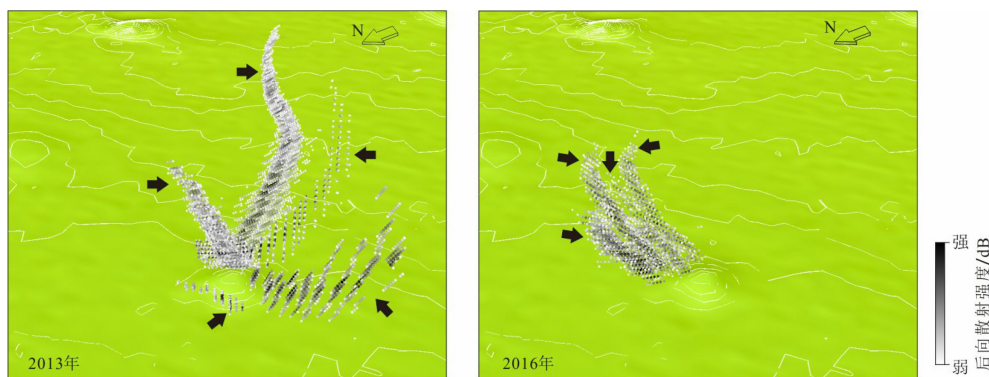


图8 不同时期观测到的羽状流(黑色箭头所指)

Fig.8 Gas flares detected at different times (The black arrows mark the gas flares)

地球物理现象识别:二维地震剖面中柱状异常声学带、海底高反射率区域和凸起以及海水声学数据中束状高后向散射强度集合,通过对这些构成要素空间叠置关系的分析提出了研究区气体排放的典型地质模型,该模型在空间上自上而下包括气体羽状流、具有高反射率的海底凸起以及近似垂直的裂隙运移通道。

(2)冲绳海槽研究区内气体排放在2013—2016年期间随时间发生变化,其分布总体上受到盆地构造作用的控制,自中新世以来斜向裂谷作用导致了当前断层模式的发育,以拉张为主的断层作用导致了断层面附近垂向运移通道的形成,地层中富甲烷流体通过该通道运移至海水-沉积物界面并在海水中最高上升至水深394.5 m处。

### 参考文献 (References)

- [1] Riedel M, Scherwath M, Römer M, et al. Distributed natural gas venting offshore along the Cascadia margin [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3264.
- [2] Tryon M D, Brown K M, Torres M E, et al. Measurements of transience and downward fluid flow near episodic methane gas vents, Hydrate Ridge, Cascadia [J]. *Geology*, 1999, 27(12): 1075-1078.
- [3] Haacke R R, Hyndman R D, Park K P, et al. Migration and venting of deep gases into the ocean through hydrate-choked chimneys offshore Korea [J]. *Geology*, 2009, 37(6): 531-534.
- [4] Haese R R, Meile C, Van Cappellen P, et al. Carbon geochemistry of cold seeps: methane fluxes and transformation in sediments from Kazan mud volcano, eastern Mediterranean Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212(3-4): 361-375.
- [5] Reeburgh W S. Oceanic methane biogeochemistry [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 486-513.
- [6] Dale A W, Regnier P, Knab N J, et al. Anaerobic oxidation of methane (AOM) in marine sediments from the Skagerrak (Denmark): II. Reaction-transport modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(12): 2880-2894.
- [7] Xu W Y, Germanovich L N. Excess pore pressure resulting from methane hydrate dissociation in marine sediments: a theoretical approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B1): B01104.
- [8] Biastoch A, Treude T, Rüpke L H, et al. Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(8): L08602.
- [9] Yamamoto A, Yamanaka Y, Oka A, et al. Ocean oxygen depletion due to decomposition of submarine methane hydrate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(14): 5075-5083.
- [10] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [11] Mazzini A, Etiope G. Mud volcanism: an updated review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 168: 81-112.
- [12] Roberts H H. Fluid and gas expulsion on the northern Gulf of Mexico continental slope: Mud-prone to mineral-prone responses[M]//Paull C K, Dillon W P. Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection: Occurrence, Distribution, and Detection, Volume 124. Washington, DC: American Geophysical Union, 2001: 145-161.
- [13] Roberts H H, Hardage B A, Shedd W W, et al. Seafloor reflectivity-An important seismic property for interpreting fluid/gas expulsion geology and the presence of gas hydrate [J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(5): 620-628.
- [14] Li A, Davies R J, Mathias S A, et al. Gas venting that bypasses the feather edge of marine hydrate, offshore Mauritania [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 402-409.
- [15] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed [J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3-4): 147-154.
- [16] Milkov A V, Sassen R, Apanasovich T V, et al. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 1037.
- [17] Arntsen B, Wensaas L, Løseth H, et al. Seismic modeling of gas chimneys [J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM251-SM259.
- [18] Moss J L, Cartwright J. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia [J]. *Basin Research*, 2010, 22(4): 481-501.
- [19] Løseth H, Wensaas L, Arntsen B, et al. 1000 m long gas blow-out pipes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(5): 1047-1060.
- [20] 业治铮, 张明书, 潘志良. 冲绳海槽晚更新世—全新世沉积物的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(2): 1-14. [YE Zhizheng, ZHANG Mingshu, PAN Zhiliang. A preliminary study of Late Pleistocene-Holocene sediments in the Okinawa trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, 3(2): 1-14.]
- [21] Sibuet J C, Deffontaine B, Hsu S K, et al. Okinawa trough backarc basin: early tectonic and magmatic evolution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B12): 30245-30267.
- [22] Lee C S, Shor Jr G G, Bibee L D, et al. Okinawa trough: origin of a back-arc basin [J]. *Marine Geology*, 1980, 35(1-3): 219-241.
- [23] Kimura M. Back-arc rifting in the Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2(3): 222-240.
- [24] Letouzey J, Kimura M. Okinawa Trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2(2): 111-130.
- [25] Gungor A, Lee G H, Kim H J, et al. Structural characteristics of the northern Okinawa Trough and adjacent areas from regional seismic reflection data: Geologic and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2012, 522-523: 198-207.
- [26] Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, et al. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 154-196.
- [27] 金翔龙, 喻普之. 冲绳海槽的构造特征与演化[J]. *中国科学 B辑*, 1988, 31(5): 614-623. [JIN Xianglong, YU Puzhi. Structure and tectonic evolution of Okinawa trough [J]. *Scientia Sinica (Series B)*,



- 1988, 31 (5): 614-623.]
- [28] Fabbri O, Monié P, Fournier M, et al. Transtensional deformation at the junction between the Okinawa trough back-arc basin and the SW Japan island arc [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 227(1): 297-312.
- [29] Lu R S, Pan J J, Lee T C. Heat flow in the southwestern Okinawa Trough [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 55 (2): 299-310.
- [30] 栾锡武. 热液活动区数目和洋脊扩张速率的关系及其在冲绳海槽的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26 (2): 55-64. [LUAN Xiwu. Relationship between the number of hydrothermal activity fields and spreading rate and its application in the Okinawa Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26 (2): 55-64.]
- [31] 栾锡武. 琉球沟弧盆系的海底热流分布特征及冲绳海槽热演化的数值模拟[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28 (1): 44-48. [LUAN Xiwu. Study of heatflow distribution of Ryukyu TA-B-A system and thermo dynamic modeling of Okinawa Trough [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28 (1): 44-48.]
- [32] Tsuji T, Takai K, Oiwane H, et al. Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa trough based on seismic reflection data [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2012, 213-214: 41-50.
- [33] 尚鲁宁, 张训华, 韩波. 重磁资料揭示的冲绳海槽及邻区断裂和岩浆岩分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36 (1): 99-106. [SHANG Luning, ZHANG Xunhua, HAN Bo. Fault belts and igneous rocks of the Okinawa Trough and adjacent areas: evidence from gravity and magnetic data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36 (1): 99-106.]
- [34] 栾锡武, 秦蕴珊. 冲绳海槽古段西部槽底海底气泉的发现[J]. *科学通报*, 2005, 50 (13): 1358-1365. [LUAN Xiwu, QIN Yunshan. Gas seepage on the sea floor of Okinawa trough Miyako Section [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (13): 1358-1365.]
- [35] Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in mid-okinawa trough backarc basin [J]. *Science*, 1990, 248 (4959): 1093-1096.
- [36] Xu C L, Wu N Y, Sun Z L, et al. Methane seepage inferred from pore water geochemistry in shallow sediments in the western slope of the Mid-Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 306-315.
- [37] 李清, 蔡峰, 梁杰, 等. 东海冲绳海槽西部陆坡甲烷渗漏发育的孔隙水地球化学证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 58 (6): 986-995. [LI Qing, CAI Feng, LIANG Jie, et al. Geochemical constraints on the methane seep activity in western slope of the middle Okinawa Trough, the East China Sea [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58 (6): 986-995.]
- [38] Yin P, Berné S, Vagner P, et al. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2003, 194 (3-4): 135-149.
- [39] Wan Z F, Yao Y J, Chen K W, et al. Characterization of mud volcanoes in the northern Zhongjiannan Basin, western South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2019, 54 (1): 177-189.
- [40] Prior D B, Doyle E H, Kaluza M J. Evidence for sediment eruption on deep sea floor, gulf of Mexico [J]. *Science*, 1989, 243 (4890): 517-519.
- [41] Serié C, Huuse M, Schødt N H, et al. Gas hydrate pingoes: deep seafloor evidence of focused fluid flow on continental margins [J]. *Geology*, 2012, 40 (3): 207-210.
- [42] Koch S, Berndt C, Bialas J, et al. Gas-controlled seafloor doming [J]. *Geology*, 2015, 43 (7): 571-574.
- [43] Mienis F, de Stigter H C, White M, et al. Hydrodynamic controls on cold-water coral growth and carbonate-mound development at the SW and SE Rockall Trough margin, NE Atlantic Ocean [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54 (9): 1655-1674.
- [44] Hovland M, Talbot M R, Qvale H, et al. Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North Sea [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57 (5): 881-892.
- [45] 龚建明. 冲绳海槽天然气水合物成因及资源潜力评价[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2007. [GONG Jianming. Origin and resources assessment of gas hydrate in Okinawa Trough[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2007.]
- [46] Hornbach M J, Saffer D M, Holbrook W S. Critically pressured free-gas reservoirs below gas-hydrate provinces [J]. *Nature*, 2004, 427 (6970): 142-144.
- [47] Cartwright J, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91 (8): 1141-1166.
- [48] McGinnis D F, Greinert J, Artemov Y, et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (C9): C09007.
- [49] Liu B, Li S Z, Suo Y H, et al. The geological nature and geodynamics of the Okinawa Trough, western Pacific [J]. *Geological Journal*, 2016, 51 (S1): 416-428.
- [50] Autin J, Bellahsen N, Leroy S, et al. The role of structural inheritance in oblique rifting: insights from analogue models and application to the Gulf of Aden [J]. *Tectonophysics*, 2013, 607: 51-64.
- [51] Mazzini A, Nermoen A, Krotkiewski M, et al. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (9): 1751-1765.
- [52] Choi J H, Seol Y, Boswell R, et al. X - ray computed - tomography imaging of gas migration in water - saturated sediments: from capillary invasion to conduit opening [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (17): L17310.
- [53] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12 (4): 507-516. [JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, ZENG Jianhui, et al. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (4): 507-516.]
- [54] Plaza-Faverola A, Keiding M. Correlation between tectonic stress regimes and methane seepage on the western Svalbard margin [J]. *Solid Earth*, 2019, 10 (1): 79-94.