



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

骆迪, 蔡峰, 阎桂京, 李清, 孙运宝, 董刚, 李昂

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

LUO Di, CAI Feng, YAN Guijing, LI Qing, SUN Yunbao, DONG Gang, and LI Ang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录](#)

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenu area on the northern continental slope of the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

[西太平洋弧后盆地的热液系统及其岩浆环境研究](#)

Seafloor hydrothermal system and its magmatic setting in the western Pacific back-arc basins
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 12

[江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义](#)

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

[南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景](#)

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

[西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究](#)

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040902

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

骆迪^{1,2}, 蔡峰^{1,2}, 闫桂京^{1,2}, 李清^{1,2}, 孙运宝^{1,2}, 董刚^{1,2}, 李昂^{1,2}

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: 海底泥底辟和泥火山对研究海底深部地球化学过程与全球碳循环、油气与天然气水合物资源勘查和新构造运动等具有重要的意义。利用高分辨率多道地震、浅地层剖面以及多波束等地球物理数据, 对冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山的特征进行了分析和总结。冲绳海槽西部陆坡发育大量的泥底辟和泥火山, 多发育于断裂活动强烈的区域, 随着泥底辟的活动和甲烷流体的运移, 在海底形成泥火山和气烟囱, 因此, 泥火山和气烟囱多发育于泥底辟上部, 两翼存在强振幅异常, 内部表现为低频特征, 证明泥底辟和泥火山与甲烷流体活动存在密切联系。冲绳海槽西部陆坡泥火山和泥底辟的形成演化的动力学过程与成因主要包括 3 个方面, 即区域拉张作用形成的构造薄弱带、快速沉积造成的超压和浮力作用以及流体的驱动作用。

关键词: 泥底辟; 泥火山; 高分辨率地震; 流体运移; 冲绳海槽

中图分类号:P738.1 文献标识码:A

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

LUO Di^{1,2}, CAI Feng^{1,2}, YAN Guijing^{1,2}, LI Qing^{1,2}, SUN Yunbao^{1,2}, DONG Gang^{1,2}, LI Ang^{1,2}

1. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Submarine mud diapirs and mud volcanoes are of great significance to the study of deep sea geochemical processes and global carbon cycle, the exploration of oil and gas hydrate resources and neotectonic activities. In this paper, the characteristics of mud diapir and mud volcanoes on the western slope of the Okinawa Trough are described and summarized with the geophysical data of high-resolution multi-channel seismic, sub-bottom profiling and multi-beam bathymetry survey. A large number of mud diapirs and mud volcanoes have been observed on the western slope of Okinawa Trough, mostly in the areas with strong fault activities. With the movement of mud diapirs and the migration of methane fluid, mud volcanoes and gas chimneys are commonly formed on the seafloor, mostly on the upper part of mud diapirs, with strong amplitude anomalies on the two wings and low frequency inside, which proves that the formation of mud diapirs and mud volcanoes are closely related to methane fluid activities. The dynamic evolution of mud volcanoes and mud diapirs on the western slope of the Okinawa Trough mainly includes three types: the weak structural zone formed by regional tension, the overpressure and buoyancy zone caused by rapid deposition, and the type formed by fluid driving.

Key words: mud diapir; mud volcano; high resolution seismic; fluid migration; Okinawa Trough

泥底辟和泥火山具有相同的形成机制和相似的发育演化特征, 都是由低密度、高塑性的泥页岩在浮力作用下向上运移而形成的地质构造, 是深层超压流体释放的结果。泥底辟为深部富含甲烷流体向上运移提供了良好的通道, 流体沿泥底辟或与

泥底辟相连的断裂和裂隙向上运移, 泥火山常位于泥底辟之上, 是深层泥底辟发展到最终阶段的表现。大多数泥底辟和泥火山出现在以挤压构造背景为主的增生楔地区, 如地中海^[1-3]、巴巴多斯^[4]、加的斯湾^[2,5]、中国南海东北部^[5]、马克兰增生楔^[6]等,

资助项目:国家自然科学基金“冲绳海槽北部火山岩三维位场统计学联合反演及多属性聚类成像”(41506085); 中国地质调查项目(DD20190819)

作者简介:骆迪(1982—), 女, 副研究员, 主要从事海洋综合地球物理及天然气水合物研究, E-mail: luodi0927@sina.com

通讯作者:蔡峰(1965—), 男, 研究员, 主要从事资源评价及油气地质研究, E-mail: caifeng@cgs.cn

收稿日期:2021-04-09; 改回日期:2021-10-09. 蔡秋蓉编辑

也有一些发生在伸展构造背景地区,如黑海^[7],中国南海琼东南盆地、珠江口盆地等地区^[8-10]。

海底泥底辟和泥火山具有重要的研究意义,泥底辟和泥火山活动伴生以甲烷为主的烃类流体,是岩石圈甲烷通量的重要来源^[11],对理解海底深部的地球化学过程和全球碳循环具有重要的意义。已发现大量与泥底辟和泥火山相伴生的油气和天然气水合物资源,是海底资源勘查的重要标志^[12]。海底泥火山和泥底辟活动可能会影响钻井作业、环网安装和管道路线等^[13-14]。泥火山与活动断层和地震密切相关^[15-16],是新构造运动的标志^[17]。

冲绳海槽位于中国东海大陆架边缘(图1),具有非常独特的地质背景,是一个初期阶段的弧后伸展盆地。虽然冲绳海槽泥底辟和泥火山已有零星报道^[19-21],但由于缺少详细的地球物理数据,对于冲绳海槽泥底辟和泥火山的系统性研究相对较少。近年来,在冲绳海槽西部陆坡进行了多道地震、海底浅剖、多波束和浅钻取样等地质调查,为深入研究该区泥底辟和泥火山的特征及分布规律提供了重要的数据基础。

1 地质背景

冲绳海槽位于欧亚板块和太平洋板块的汇聚边缘,自中新世以来,由于太平洋板块向西俯冲,欧亚板块向东蠕动,琉球弧后开始扩张而形成,是一个边缘盆地,介于主动边缘和被动边缘之间,处于大陆裂谷作用的初始阶段^[22]。冲绳海槽的西部陆

坡与东海大陆架相连,紧邻东海大陆架外缘,呈 NE-SW 向弧形条带状分布,地形由大陆架向海槽骤然变陡,是大陆架向冲绳海槽的过渡带。由于新生代以来构造变动比较强烈,海底地形复杂,地貌类型多样,陆坡上发育一系列特殊的地质构造,如海底峡谷、滑塌体、断块隆基、泥火山等类型。冲绳海槽主要发育大陆坡和槽底平原两个地貌单元,局部发育龙王隆起构造带。大陆坡和槽底平原之间张性正断裂活动发育,在海底形成阶梯状地貌,海底地形坡度大,水深变化快,呈断块下沉,大陆坡水深约 150 m,槽底平原水深超过 2 000 m。

冲绳海槽发育两条重要的 NW 向走滑断裂,即吐噶喇断裂和宫古断裂,将海槽划分为北、中、南 3 段,不同部位的构造活动存在差异,表现出不同的构造特征。北段和中段张裂作用开始于中新世,表现为一系列雁列式地堑和半地堑,而南部弧后张裂始于早更新世^[23],呈现出几乎对称的断裂系统。冲绳海槽主要发育 NEE-NE、NNE-NS 和 NW 向 3 组断裂。NEE-NE 向断裂占据主导地位,与海槽现代张裂活动有关,控制着整体沉积和构造格架。NNE-NS 向断裂表现为右行张扭,使冲绳海槽的轴部地堑发生进一步拉伸裂陷。NW 向断裂横切构造走向,由中国东部大陆发育的 NW 向断裂向东扩展而形成,切割或限制 NE 向断裂^[24],属于水平走滑断裂,大部分具有左旋性质^[25-26]。

冲绳海槽沉积了巨厚的第四纪沉积层(图2),主要发育新近系地层,划分为全新统、更新统和上新统,以第四纪沉积为主。全新统为半深海软泥沉

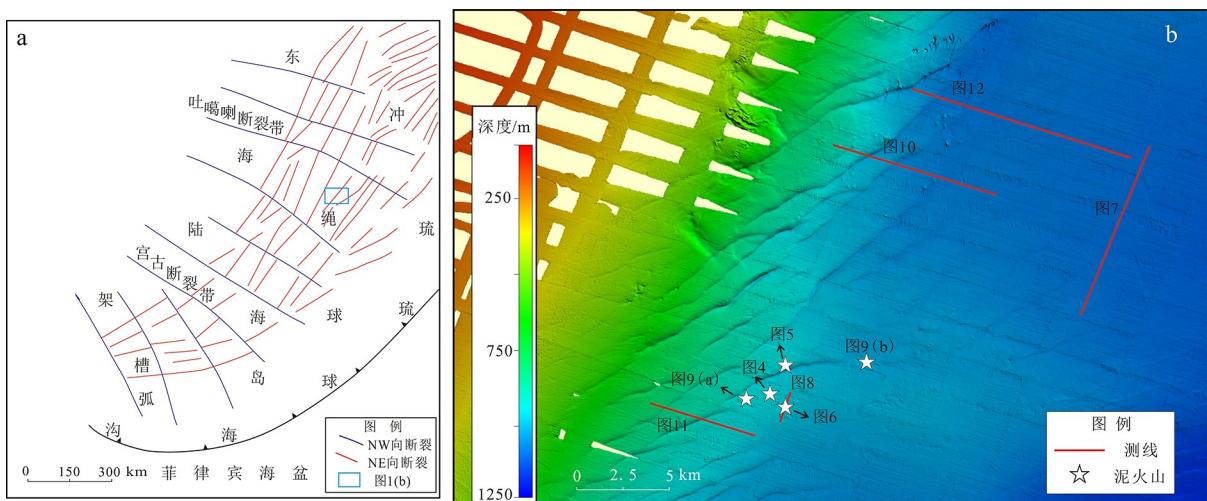


图 1 研究区位置图

a. 研究区位置和冲绳海槽及邻区断裂图^[18], b. 研究区多波束水深图。

Fig.1 Schematic geographic map of studied area

a. location of the study area and faults map of Okinawa Trough and adjacent areas^[18], b. Multibeam bathymetric map of the study area.

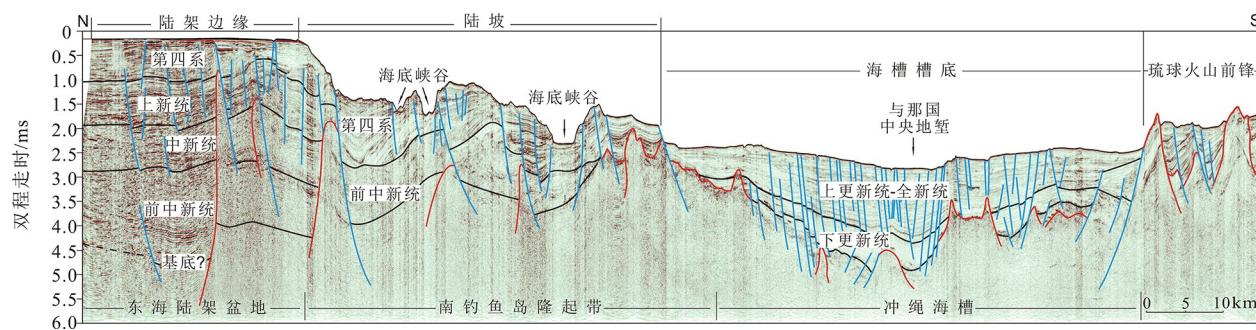


图 2 沖繩海槽地震剖面^[27]
Fig.2 A seismic profile of Okinawa Trough^[27]

积物, 厚度约几米至几十米, 在海槽中心的张裂地堑内, 厚度明显增大, 在海槽中部的伊平屋地堑和南部的八重山地堑厚度可达 30 m, 并显示出浊流沉积特征。第四系在海槽轴部厚度最大, 向两侧槽坡处减薄。上更新统为浊流沉积与半深海软泥沉积, 地震反射以平行反射结构为主, 在陆坡上部发育三角洲前积层。中更新统沉积层为以陆屑为主的海相沉积, 厚度较大, 地震反射呈亚平行或波状起伏的内部反射结构, 厚度变化较大, 几米至上千米, 最厚可达 1 500 m, 一般北部厚度比南部大, 并且由中心向两侧减薄。下更新统沉积层呈水平分布, 与上覆地层呈斜交接触, 厚度约 1 000~2 000 m。上新统沉积层主要为浅海相泥岩, 局部发育, 主要发育在海槽两坡, 其厚度在海槽两坡大, 向海槽中心减薄直至消失^[28-30]。冲绳海槽沉积中有机质含量高, 碳含量为 0.75%~1.25%。冲绳海槽长期以来一直是中国大陆风化剥蚀产物经搬运入海后的一个主要汇聚盆地, 沉积物主要是陆源和生物源成分, 富含有机物的沉积物快速堆积下来, 大量的有机物得以保存, 经细菌作用转变为大量的甲烷。具有较高的沉积速率, 据估计, 平均沉积速率为 3~4 m/ka, 短期内局部可达 8 m/ka, 较快的沉积速率容易形成沉积物欠压实区, 构筑了良好的流体输导体系^[31]。

2 数据与方法

在冲绳海槽西部陆坡进行了高分辨率多道地震、浅地层剖面和多波束等地球物理调查。使用多道地震和浅地层剖面, 可以发挥各自的优势, 在穿透性和分辨率方面互补。本文高分辨率多道地震采用 20 kJ 电火花震源, 48 道采集, 道间距 6.25 m, 炮间距 12.5 m, 电火花震源沉放深度 2 m, 电缆沉放深度 2 m, 最大炮检距 331.25 m, 采样间隔为 0.5 ms。电火花震源主频较高, 约 200 Hz, 频带宽(70~

400 Hz), 因此, 具有更高的垂向与横向勘探分辨率, 垂向分辨率可达 1~3 m^[32-33]。浅地层剖面所用的采集设备为船载 TOPAS PS18 参量声源浅地层剖面仪, 该浅地层剖面仪基于水柱中的两个高强度声束在较高频率下(约 18 kHz 中心对称)的非线性相互作用而产生的低频声波, 产生的信号具有较高的相对带宽(约 80%), 窄波束剖面(接近所发射的高频信号)没有旁瓣, 适用于高分辨率浅地层剖面和水下目标探测, 工作水深为 20 m 到全海深, 其穿透能力较好, 且分辨率非常高^[34]。采用 Chirp 波作为发射信号, 激发频率 2~6 kHz, Chirp 波是介于 Ricker 波和 Bursts 波之间的一种波形, 兼顾了一定的分辨率与穿透能力, 适用于水深 1 000~2 500 m 的海域。多波束数据采用船载 EM122 多波束系统, 使用 Qimera 处理软件, 原始数据经过船只吃水改正、声线折射改正、数据滤清、数据恢复等处理步骤, 有效消除了异常点, 保留了海底的各种地貌特征。

3 泥底辟和泥火山的地球物理识别及特征

3.1 泥底辟特征

冲绳海槽西部陆坡泥底辟构造发育, 大多数泥底辟在地震剖面中主要表现为横向同相轴的突然中断, 内部呈不连续的杂乱或空白反射, 围岩与其分界明显, 但与火山相比, 泥底辟与围岩之间没有明显的波阻抗界面。冲绳海槽西部陆坡发育多种类型的泥底辟, 根据泥底辟的形态, 可将其分为锥状(图 3a)和蘑菇状(图 3b)。由于泥底辟活动时上侵挤入底辟的垂向上拱作用力强, 底辟拱起幅度高, 其底辟能量达到两侧地层的破坏力, 使围岩具有清晰的上翘牵引特征, 如图 3b。当流体充注沉积层, 导致地震波速度降低, 从而引起反射同相轴下

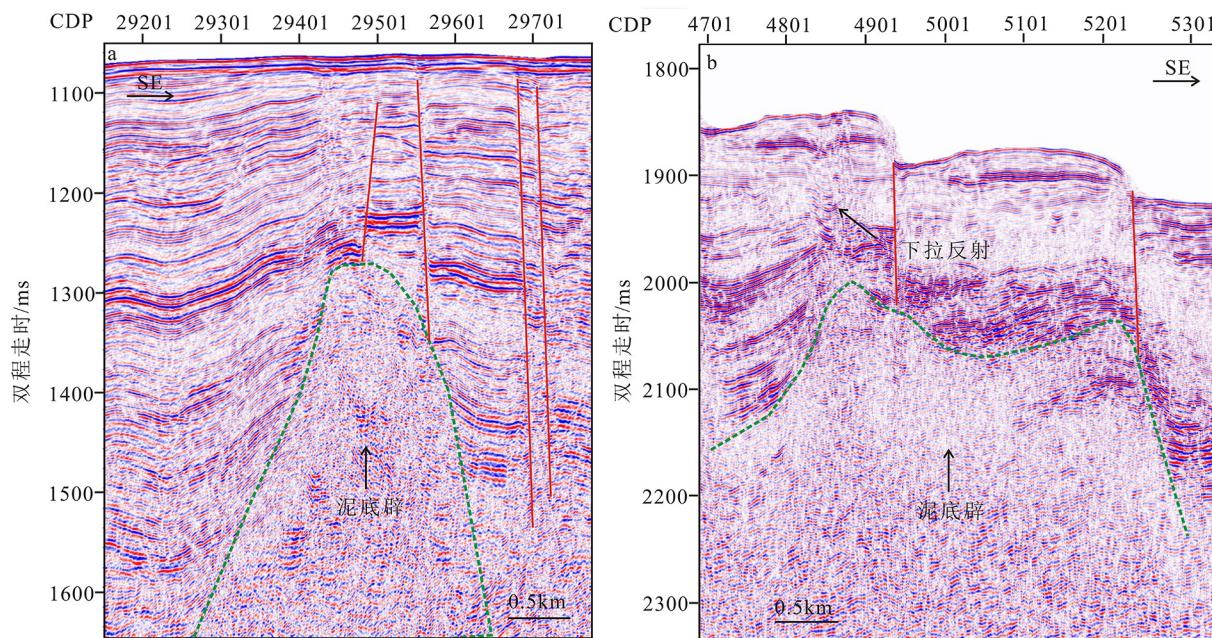


图3 多道地震剖面显示的不同形态泥底辟

a. 锥状泥底辟, b. 蘑菇状泥底辟。

Fig.3 Mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

a. conical shaped mud diapir, b. mushroom shaped mud diapir.

拉,通常表现为水平反射层向下倾斜或弯曲(图3)。根据泥底辟的规模、活动能量及侵入高度,可将泥底辟分为浅埋型和深埋型^[35],深埋型泥底辟的特点是拱起的幅度较低,仅刺穿深度地层,被上覆巨厚的沉积层所覆盖,在地震剖面中呈低幅度背斜(图4a)。浅埋型泥底辟的活动能量相对较强,拱起幅

度较高,但尚未完全刺穿上覆地层达到海底(图4b)。

3.2 泥火山特征

多波束资料显示,冲绳海槽西部陆坡泥火山发育,主要位于900~1 000 m水深处,泥火山规模各不相同,与世界其他地区的泥火山相比相对较小,

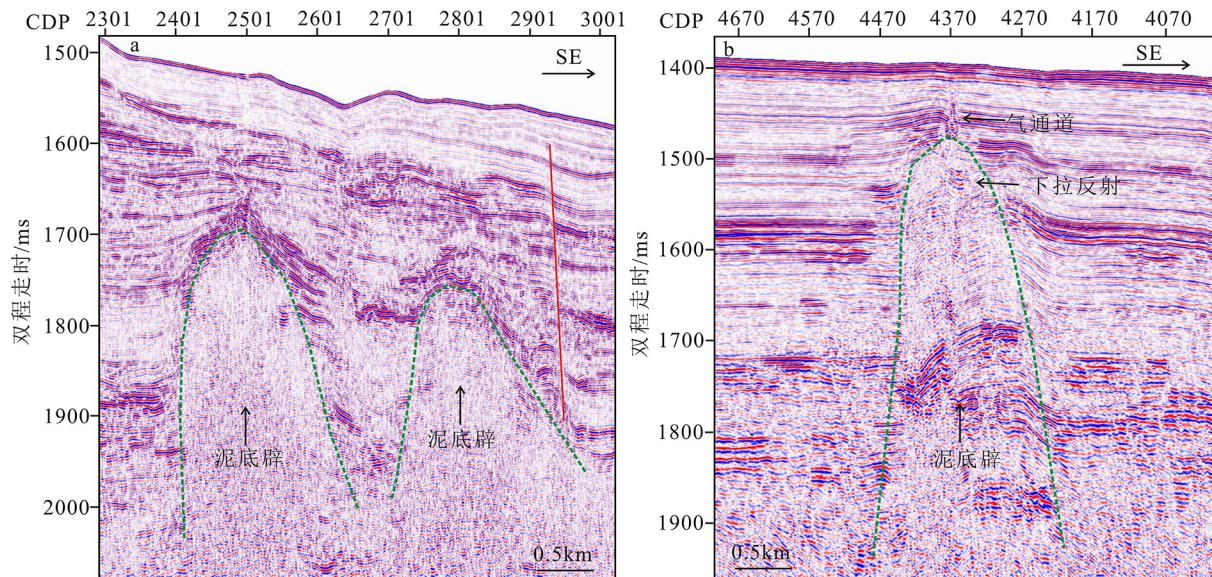


图4 不同规模泥底辟

a. 深埋型泥底辟, b. 浅埋型泥底辟。

Fig.4 Different scales of mud diapirs

a. deep buried mud diapir, b. shallow buried mud diapir.

高度从高于海底数米至几十米不等, 一般不超过 100 m, 直径约 100~600 m, 坡度约 1°~16°。根据泥火山的形态特征, 可分为 3 种类型: 第 1 种泥火山口较为平缓, 高度和坡度较小(图 5), 该泥火山仅高出海底约 2~4 m, 坡度 1°~2°, 直径约 250 m, 内部呈空白反射, 两翼地层没有明显的上拱(图 5b)。第 2 类泥火山的顶部呈复杂形状, 尺寸相对较大(图 6), 该泥火山口呈不规则形状, 直径约 300~600 m, 高出海底之上约 20 m。第 3 类泥火山呈圆锥状, 高度和坡度相对较大(图 7), 该泥火山高度约为海底之上 400 m, 坡度约 15°(图 7a), 通道内部呈空白反射, 两翼地层存在明显上拱(图 7b)。

3.3 泥底辟和泥火山与甲烷流体活动

孔隙水地球化学特征是研究甲烷渗漏的重要手段, 对冲绳海槽西部陆坡泥火山发育区重力柱取

样获得的沉积物进行了孔隙水研究, 研究成果揭示了泥火山发育区的沉积物中富含甲烷流体, 甲烷气源为热解成因或以热解成因为主的混合成因气体^[36-38]。

泥底辟和泥火山构造具有较强的气体渗漏作用^[39], 因此, 通常在其顶部或两侧存在明显的“亮点”强振幅异常反射(图 8)。气烟囱是底辟作用发展至强刺穿—塌陷阶段的结果, 常伴随泥底辟出现, 位于泥底辟之上。图 8 剖面发育规模较大的泥底辟, 形成于早更新世以前, 仅刺穿早更新世地层。该泥底辟呈圆锥状, 顶部存在强振幅异常和气烟囱通道, 气烟囱内部呈杂乱弱振幅反射, 具有明显的“下拉”特征。随着泥底辟的活动和甲烷流体的运移及喷发使海底在气烟囱上部形成麻坑, 进一步证明了甲烷流体活动的存在。

泥火山为甲烷流体向海底运移提供了良好的通道, 图 9 为浅地层剖面, 该剖面中发育 3 处泥火

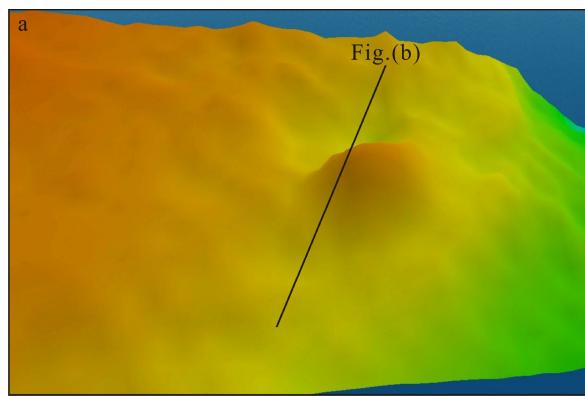


图 5 第 1 种类型泥火山多波束地形图和浅地层剖面

a. 多波束地形图; b. 过泥火山的浅地层剖面, 测线位置如图 5a 所示。

Fig.5 Multi-beam bathymetry map and sub-bottom profile of the first type of mud volcano

a. multi-beam bathymetry map; b. the sub-bottom profile crossing the mud volcano, see Fig. 5a for location.

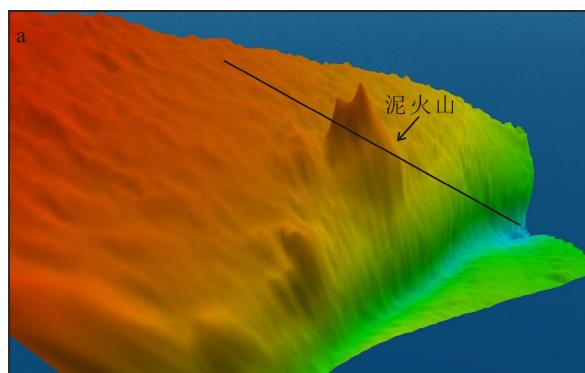
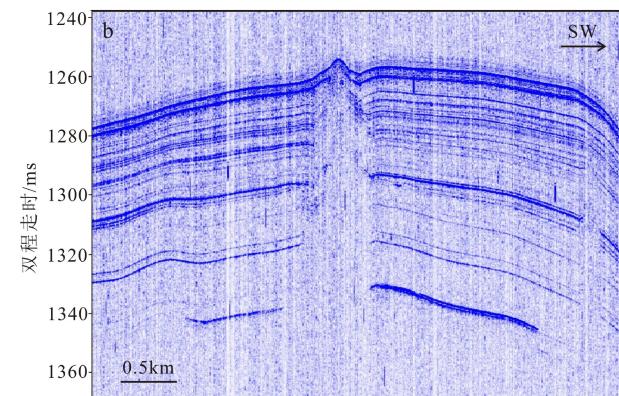
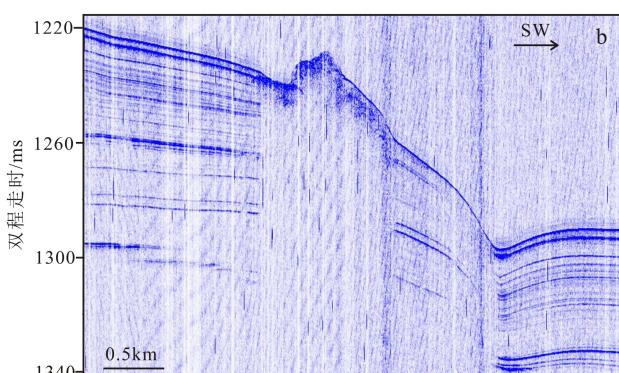


图 6 不规则状泥火山口多波束地形图和浅地层剖面

a. 多波束地形图; b. 过泥火山的浅地层剖面, 测线位置如图 6a 所示。

Fig.6 Multi-beam bathymetry map and sub-bottom profile of the irregular mud volcano summit caldera

a. multi-beam bathymetry map; b. the sub-bottom profile crossing the mud volcano. See Fig.6a for location.



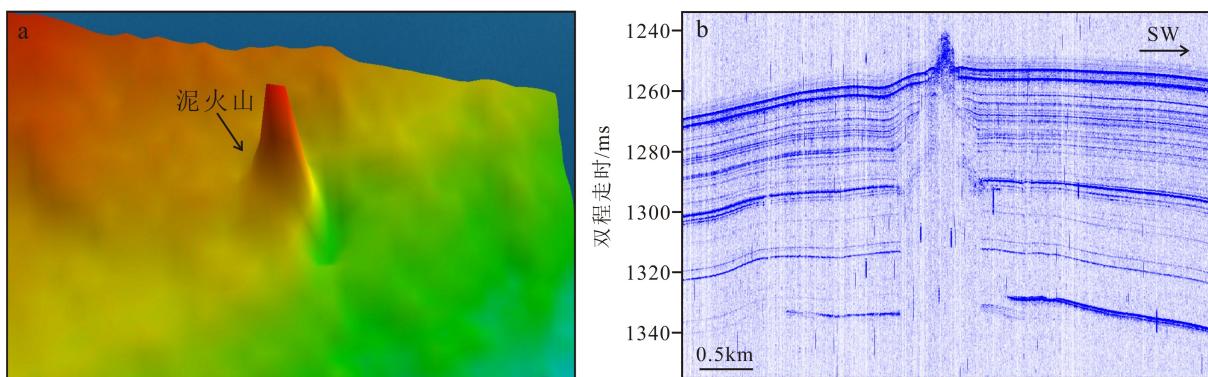


图7 圆锥状泥火山多波束地形图和浅地层剖面

a. 多波束地形图; b. 过泥火山的浅地层剖面, 测线位置如图7a所示。

Fig.7 Multi-beam bathymetry map of conical mud volcanoes

a. multi-beam bathymetry map; b. the sub-bottom profile crossing the mud volcano. See Fig.7a for location.

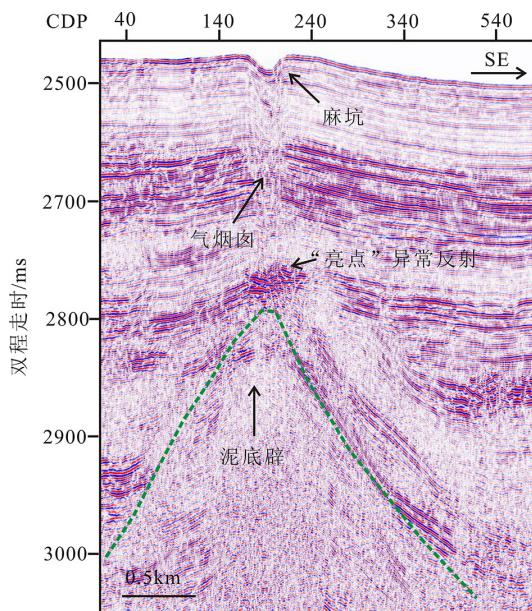


图8 泥底辟之上发育“亮点”异常反射、气烟囱及麻坑

Fig.8 “Hot spot” abnormal reflections, notice the gas chimneys and porkmarks developed on the top of mud diapirs

山, 泥火山内部表现为宽度与泥火山直径相近的垂直空白带, 泥火山内部和两翼围岩可见明显的“上拉”特征, 泥火山顶部可见抛物线状绕射波, 高约 20 ms, 推测为气体运移到水体中所形成的羽状流, 浅层沉积物的流动和甲烷流体的喷发在泥火山周边形成环形凹陷(图 10)。

图 11 所示泥火山是冲绳海槽西部陆坡横向规模最大的泥火山, 该泥火山位于水深约 930 m 处, 发育于泥底辟之上, 底辟顶部发育多个规模较小的正断层或裂隙, 整个泥火山通道内部均可见断裂或裂隙, 但未达海底。泥火山左侧存在一些延伸至海底的正断层, 规模相对较大, 方向大致与冲绳海槽的走向平行, 这些断层或裂隙为流体运移提供了良好的通道。由瞬时频率剖面显示, 泥火山和泥底辟内部呈低频特征, 推测为气体的存在导致了高频的快速衰减。在泥火山周围可观察到一些气烟囱, 表现为低频特征, 地震波呈“上拉”或“下拉”特征, 泥火山通道两侧存在“亮点”强振幅异常反射(图 12),

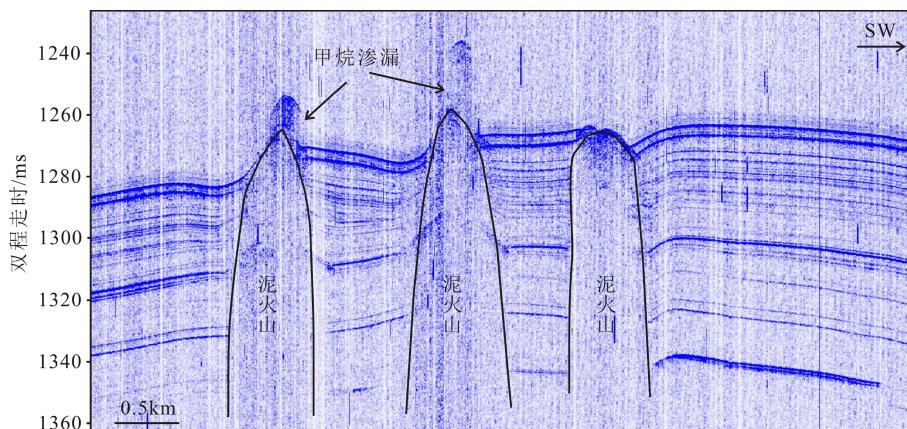


图9 泥火山浅地层剖面

Fig.9 The sub-bottom profile showing details of the mud volcanoes

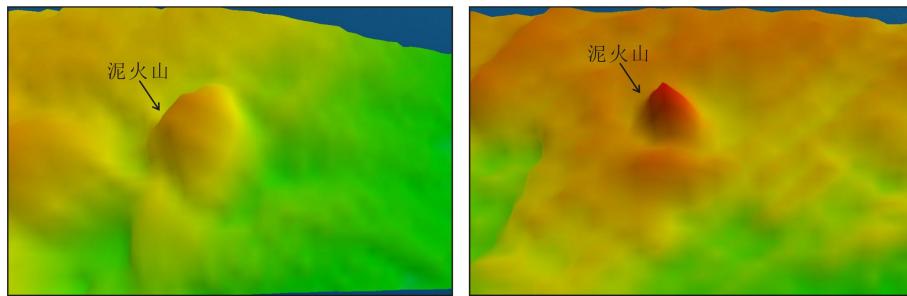


图 10 泥火山周边发育环状塌陷构造

Fig.10 Mud volcanoes surrounded by collapse-subsidence structure

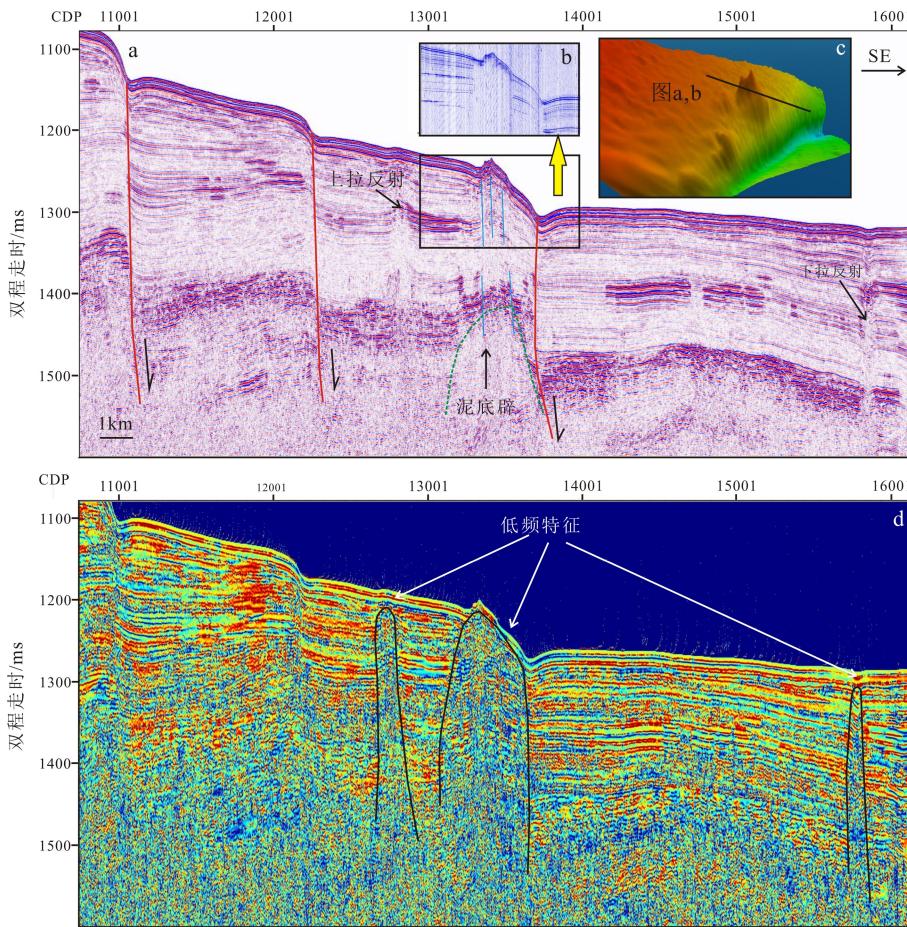


图 11 研究区最大的泥火山

a. 和 b 分别为过泥火山的多道地震剖面和浅地层剖面, 位置如图 11c 所示; c. 多波束地形图; d. 瞬时频率属性剖面。

Fig.11 The largest mud volcano in the studied area

a. and b. are multi-channel seismic section and sub-bottom profile crossing the mud volcano, See Fig.11c for location.; c. multi-beam bathymetry map;
d. instantaneous frequency profile.

以上证据表明泥火山周边存在甲烷流体活动。

4 讨论

通常情况下, 泥火山形成的主要驱动力是构造挤压作用, 但是, 冲绳海槽是一个高热流背景下的弧后盆地, 没有明显的构造挤压作用。结合冲绳海

槽区域构造特征和构造演化, 分析认为, 泥火山的形成动力演化的动力学过程与成因主要包括 3 个方面, 即区域拉张作用形成的构造薄弱带, 快速沉积造成的超压和浮力以及流体驱动作用。

区域拉张作用是触发泥火山形成的关键因素^[40]。冲绳海槽是活动大陆边缘弧后盆地的早期演化阶段, 同时又具有被动大陆边缘拉张裂离的特点^[26],

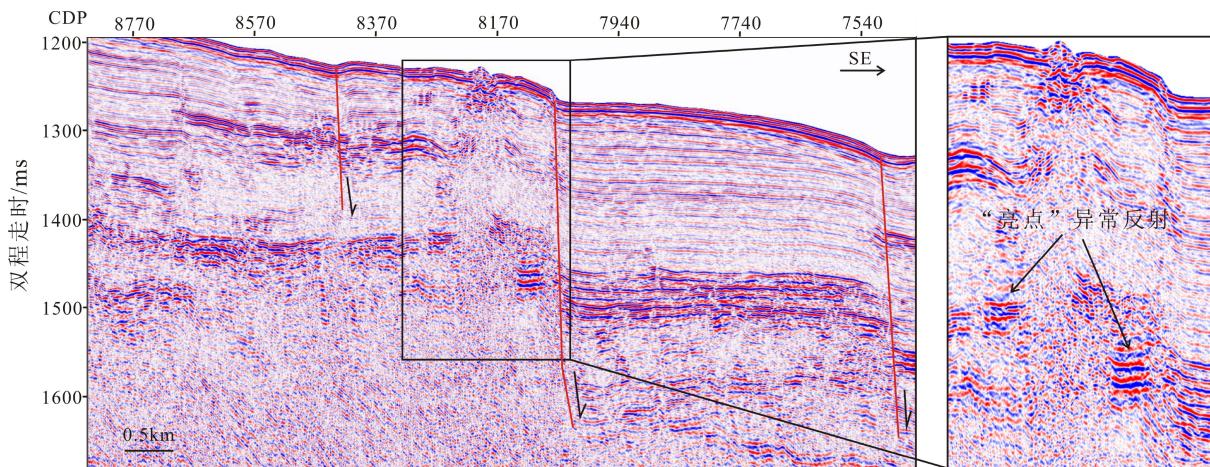


图 12 泥火山周边发育强振幅异常
Fig.12 Strong amplitude anomalies around mud volcanoes

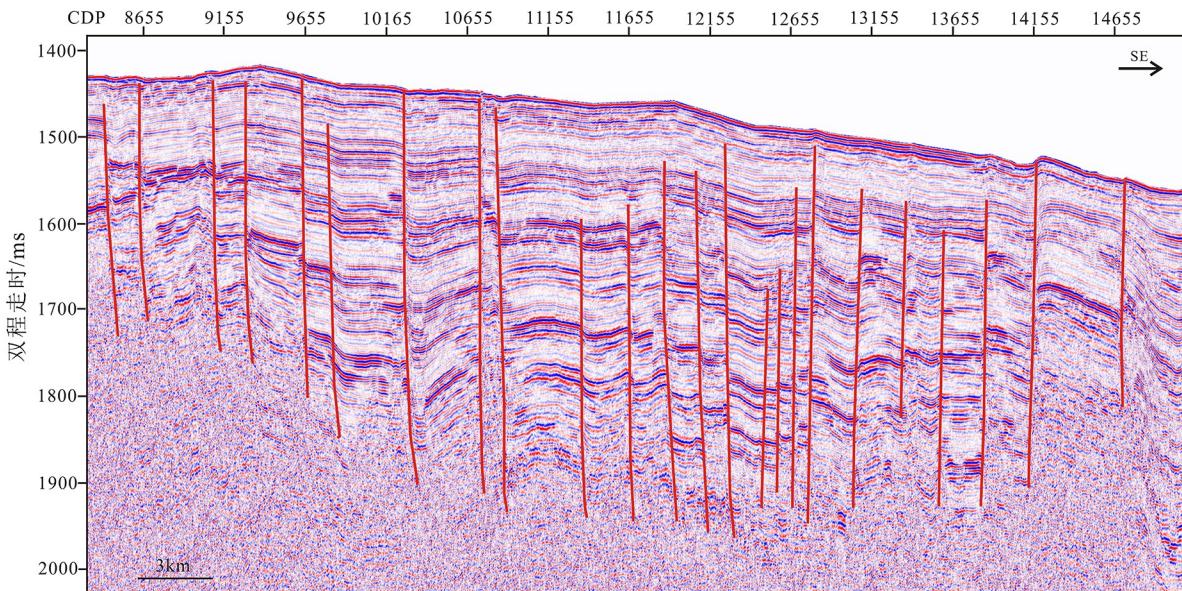


图 13 地震剖面显示正断层
Fig.13 Seismic profile showing normal faults

拉张作用形成大量的断裂和裂缝,由地震资料显示(图 13),冲绳海槽西部陆坡发育大量的 NE 向正断层,近平行于构造走向,呈雁列状展布,大多正断层直达海底,表明这些断裂至今仍处于活动中。断裂活动造成易于遭受破坏的构造薄弱带,为深部超压的释放提供了通道,进而为泥底辟和泥火山的形成提供了驱动力。研究区发现的泥火山和泥底辟主要集中于断裂发育区,大部分泥火山沿着活动断裂分布。

快速沉积造成的超压和浮力作用是冲绳海槽泥火山形成的主要动力。冲绳海槽沉积数千米厚度的上新统一更新统地层,在冰川时期,海平面下降导致大陆架变窄,长江携带大量的陆源物质直接

输送到大陆架,在冲绳海槽西部陆坡附近快速沉降^[41],因此,冲绳海槽西部陆坡具有较高的沉积速率,岩心测年分析结果显示,冲绳海槽沉积速率为 10~40 cm/ka,最高可达 80 cm/ka^[30]。快速沉积是超压形成的主要因素,当快速沉积导致覆岩载荷急剧增加时,孔隙流体无法排出,导致孔隙体积减小,不能达到平衡。然后,孔隙流体将承受部分载荷压力,导致动水压力大于静水压力,从而产生超压^[42]。超压是泥火山形成的首要条件。当孔隙流体压力超过内力或静岩压力时,将会产生垂直的水力压裂。超压地层最初被上部地层隔离,水力压裂形成的裂隙将打破上部地层,形成流体运移通道^[40]。快速的沉积作用使黏土层不断地被浅海陆源碎屑物

埋藏, 导致黏土层中的水也被封闭起来, 随着埋深的增大, 处于封闭状态孔隙中的流体受到上覆地层的负荷, 压力逐渐升高, 从而形成欠压实的黏土岩。同时由于高密度的陆源碎屑物堆积在泥岩层之上, 形成密度倒转。密度倒转欠压实的泥岩常具有高压异常, 密度较小, 由密度差而产生的浮力使泥核向上生长发育, 从而形成泥底辟构造。泥底辟的形成为流体运移提供了通道, 而流体的排出造成浮力作用增加, 从而进一步促进泥火山的形成。分析可知, 泥火山和气烟囱大多发育在泥底辟上部, 且流体活动对冲绳海槽研究区泥火山型构造的形成起到重要的作用。当泥底辟发育到喷发阶段, 大量流体喷出, 造成孔隙度增加、密度减小, 导致浮力急剧增加, 进而形成泥火山, 而麻坑则是深部流体通过流体通道在海底强烈快速喷逸或缓慢渗漏而形成的海底地貌^[8], 常与泥火山相伴生。

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山通常发育于断裂活动强烈的区域。当向上运移的流体受到不透水层的阻挡, 断裂等构造薄弱带为流体的向上运移提供了良好的运移通道。首先, 在浮力和不平衡压实作用下, 低密度泥岩在超压带内发生塑性变形并上拱, 形成泥底辟的初始阶段。早期底辟形成的背斜形态与泥岩层热流活动的增加共同作用, 导致底辟核部流体压力进一步增大。当孔隙流体压力超过内力或静岩压力时, 形成垂直水力压裂。水力压裂为超压力流体的向上运移提供了良好的通道, 随着流体活动和水力压裂的进一步加剧而与构造断裂相连, 超压流体和泥岩沿着通道进一步刺穿, 从而形成泥底辟。最后, 晚期泥底辟强烈刺穿围岩, 形成压力急剧下降, 气体溶解度降低, 泥底辟内大量气体排出, 造成孔隙度增加, 密度下降, 进一步加大了泥底辟的浮力。孔隙流体和大量气体通过泥底辟周缘疏导通道大量逸散、喷发, 形成气烟囱, 随之在海底形成泥火山或麻坑。泥火山、麻坑的发育反映了流体渗漏强度或疏导能力的差异。

5 结论

(1) 冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山发育, 多发育于断裂活动强烈的区域, 泥底辟和泥火山顶部或两翼存在强振幅异常, 内部表现为低频特征, 泥火山和气烟囱多发现于泥底辟上方, 随着泥底辟的活动和甲烷流体的运移及喷发使海底在气烟囱上部的局部形成麻坑, 进一步证明了泥底辟和泥火山与甲烷流体活动存在密切的联系。

(2) 泥火山和气烟囱大多发育在泥底辟上部, 且流体活动对冲绳海槽研究区泥火山型构造的形成起到重要的作用。当泥底辟发育到喷发阶段, 大量流体喷出, 造成孔隙度增加、密度减小, 导致浮力急剧增加, 进而形成泥火山。

(3) 冲绳海槽是一个高热流背景下的弧后盆地, 没有明显的构造挤压作用。结合冲绳海槽区域构造特征和构造演化分析认为, 泥火山和泥底辟的形成演化的动力学过程与成因主要包括 3 个方面, 即区域拉张作用形成的构造薄弱带、快速沉积造成的超压和浮力作用以及流体的驱动作用。

参考文献 (References)

- [1] Kopf A, Robertson A H F, Clennell M B, et al. Mechanisms of mud extrusion on the Mediterranean Ridge Accretionary Complex [J]. *Geo-Marine Letters*, 1998, 18(2): 97-114.
- [2] Masclau J, Mary F, Praeg D, et al. Distribution and geological control of mud volcanoes and other fluid/free gas seepage features in the Mediterranean Sea and nearby Gulf of Cadiz [J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34(2-3): 89-110.
- [3] Lykousis V, Alexandri S, Woodside J, et al. Mud volcanoes and gas hydrates in the Anaximander mountains (Eastern Mediterranean Sea) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 854-872.
- [4] Sumner R H, Westbrook G K. Mud diapirism in front of the Barbados accretionary wedge: the influence of fracture zones and North America-South America plate motions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(5): 591-613.
- [5] 耿明会, 宋海斌, 关永贤, 等. 南海东北部深水区泥火山的分布与特征 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(10): 1-10. [GENG Minghui, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. The distribution and characteristics of mud volcanoes in the northeastern south China sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(10): 1-10.]
- [6] 孟明, 龚建明, 廖晶. 马克兰增生楔海陆泥火山气源成因 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(5): 43-48. [MENG Ming, GONG Jianming, LIAO Jing. Difference in gas sources for offshore and onshore mud volcanoes in Makran accretionary wedge [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(5): 43-48.]
- [7] Xing J H, Spiess V. Shallow gas transport and reservoirs in the vicinity of deeply rooted mud volcanoes in the central Black Sea [J]. *Marine Geology*, 2015, 369: 67-78.
- [8] 陈江欣, 关永贤, 宋海斌, 等. 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*, 2015, 58(3): 919-938. [CHEN Jiangxin, GUAN Yongxian, SONG Haibin, et al. 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*, 2015, 58(3): 919-938.]
- [9] 张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2185-2197.

- [ZHANG Wei, HE Jiaxiong, LU Zhenquan, et al. Preliminary study of the relationship between the suspected mud diapir and natural gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2185-2197.]
- [10] 王潇, 阎贫, 于俊辉, 等. 东沙岛西南泥火山地区的地震烃类检测[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 621-631. [WANG Xiao, YAN Pin, YU Junhui, et al. Seismic detection for hydrocarbon in mud volcano-rich area Southwest to the Dongsha Island [J]. *Earth Science*, 2021, 46(2): 621-631.]
- [11] 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.
- [12] He J X, Wang S H, Zhang W, et al. Characteristics of mud diapirs and mud volcanoes and their relationship to oil and gas migration and accumulation in a marginal basin of the northern South China Sea [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(15): 1122.
- [13] Feseker T, Boetius A, Wenzhöfer F, et al. Eruption of a deep-sea mud volcano triggers rapid sediment movement [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5385.
- [14] Rudolph M L, Shirzaei M, Manga M, et al. Evolution and future of the Lusi mud eruption inferred from ground deformation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1089-1092.
- [15] Chang P Y, Yang T Y, Chyi L L, et al. Electrical resistivity variations before and after the pingtung earthquake in the wushanting mud volcano area in southwestern Taiwan [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, 15(4): 219-231.
- [16] Rudolph M L, Manga M. Frequency dependence of mud volcano response to earthquakes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(14): L14303.
- [17] Bonini M. Mud volcanoes: indicators of stress orientation and tectonic controls [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(3): 121-152.
- [18] 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.]
- [19] Xu N, Wu S G, Shi B Q, et al. Gas hydrate associated with mud diapirs in southern Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1413-1418.
- [20] 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.
- [21] Xing J H, Jiang X D, Li D Y. Seismic study of the mud diapir structures in the Okinawa Trough [J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 203-208.
- [22] Sibuet J C, Letouzey J, Barbier F, et al. Back arc extension in the Okinawa Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B13): 14041-14063.
- [23] Park J O, Tokuyama H, Shinohara M, et al. Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system [J]. *Tectonophysics*, 1998, 294(1-2): 21-42.
- [24] 刘博, 李三忠, 索艳慧, 等. 冲绳海槽地质属性及其动力学机制 [C]// 2016中国地球科学联合学术年会论文集 [C]. 北京: 中国地球物理学会, 2016 [LIU Bo, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Geological attributes and dynamic mechanism of Okinawa trough [C]// 2016 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2016.]
- [25] 杨文达. 冲绳海槽现代张裂的地球物理特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 77-82. [YANG Wenda. Modern geophysical characteristics of tectonic tension fault in the Okinawa Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 77-82.]
- [26] 高金耀, 吴俊, 杨春国, 等. 冲绳海槽弧后张裂构造及其动力机制讨论 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1001-1012. [GAO Jinyao, WANG Jun, YANG Chunguo, et al. Discussion on back-arc rifting tectonics and its geodynamic regime of the Okinawa Trough [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4): 1001-1012.]
- [27] Shang L N, Zhang X H, Jia Y G, et al. Late Cenozoic evolution of the East China continental margin: insights from seismic, gravity, and magnetic analyses [J]. *Tectonophysics*, 2017, 698: 1-15.
- [28] 董刚, 蔡峰, 闫桂京, 等. 冲绳海槽西部陆坡第四纪沉积地层划分 [J]. *地质学报*, 2018, 92(12): 2550-2560. [DONG Gang, CAI Feng, YAN Guijing, et al. Quaternary stratigraphic division in the western slope of Okinawa Trough [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(12): 2550-2560.]
- [29] 王舒岐, 梁寿生. 冲绳海槽盆地的地质构造特征与盆地演化历史 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986(2): 17-29. [WANG Shutian, LIANG Shousheng. Geologic-tectonic characteristics and evolution of Okinawa Trough basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986(2): 17-29.]
- [30] 李乃胜, 姜丽丽, 李常珍. 冲绳海槽地壳结构的研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(4): 441-450. [LI Naisheng, JIANG Lili, LI Changzhen. A study on the nature of crustal structures of the Okinawa Trough [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(4): 441-450.]
- [31] 李培英, 王永吉, 刘振夏. 冲绳海槽年代地层与沉积速率 [J]. 中国科学(D辑), 1999, 42(4): 408-415. [LI Peiyng, WANG Yongji, LIU Zhenxia. Chronostratigraphy and deposition rates in the Okinawa Trough region [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1999, 42(4): 408-415.]
- [32] 骆迪, 蔡峰, 吴志强, 等. 海洋短排列高分辨率多道地震高精度成像关键技术 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(2): 730-742. [LUO Di, CAI Feng, WU Zhiqiang, et al. The key technologies of marine small scale high resolution multichannel seismic high-precision imaging [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(2): 730-742.]
- [33] Luo D, Cai F, Wu Z Q. Numerical simulation for accuracy of velocity analysis in small-scale high-resolution marine multichannel seismic technology [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(3): 370-382.
- [34] 骆迪, 蔡峰, 闫桂京, 等. 浅表层天然气水合物高分辨率地震勘探方法与应用 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 101-108. [LUO Di, CAI Feng, YAN Guijing, et al. High resolution seismic method for shallow gas hydrates exploration [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(9): 101-108.]
- [35] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010,

- 35(1): 75-86. [HE Jiaxiong, ZHU Youhai, WENG Rongnan, et al. Characters of north-west mud diapirs volcanoes in south China sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(1): 75-86.]
- [36] 李清, 蔡峰, 闫桂京, 等. 东海冲绳海槽泥火山发育区甲烷气体来源研究 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 79-86. [LI Qing, CAI Feng, YAN Guijing, et al. Origin of pore water methane recovered from mud volcanoes in the Okinawa Trough [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(9): 79-86.]
- [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] 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.
- [39] 李昂, 蔡峰, 李清, 等. 浅表层泥火山型天然气水合物成藏地质模型 [J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(9): 94-100. [LI Ang, CAI Feng, LI Qing, et al. A geological model for shallow gas hydrates accumulation associated with mud volcano [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(9): 94-100.]
- [40] Dimitrov L I. Mud volcanoes: the most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1-4): 49-76.
- [41] 郭军华, 吴时国, 徐宁, 等. 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*, 2007, 38(5): 432-437. [GUO Junhua, WU Shiguo, XU Ning, et al. Structural characteristics of gas hydrate deposition in the west slope of the Okinawa Trough and its adjacent area [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(5): 432-437.]
- [42] Talukder A R. Review of submarine cold seep plumbing systems: leakage to seepage and venting [J]. *Terra Nova*, 2012, 24(4): 255-272.