

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.003

阿拉伯海北部莫克兰增生楔天然气水合物 浅表层识别标志

张振^{1,2}, 邓希光^{1,2*}, 姚会强^{1,2}, 于淼^{1,2}, 王海峰^{1,2}, 萧惠中^{1,2}, 程园^{1,2}
ZHANG Zhen^{1,2}, DENG Xiguang^{1,2*}, YAO Huiqiang^{1,2}, YU Miao^{1,2}, WANG Haifeng^{1,2},
XIAO Huizhong^{1,2}, CHENG Yuan^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室/中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075;

2. 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广东 广州 510075

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources/Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China;

2. National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou 510075, Guangdong, China

摘要:阿拉伯海北部的莫克兰增生楔是阿拉伯板块以低速、低角度俯冲到欧亚板块之下形成的主动陆缘构造, 蕴藏着丰富的天然气水合物资源。依据 2019 年中国在莫克兰增生楔海域采集的高分辨率多道地震资料、浅地层剖面及多波束测深数据, 并结合以往的调查成果, 探讨莫克兰海域天然气水合物存在的浅表层识别标志。地震识别标志主要有似海底反射层 (BSR) 和振幅空白带 2 种标志, 地形地貌标志包括海底麻坑、海底滑塌、丘状体、泥火山、冷泉系统等, 水体标志主要为羽状流。在水深 1000 m 和 2900 m 的站位已分别钻获水合物样品。莫克兰增生楔丰富的水合物识别标志可能与低速、低角度的俯冲地质背景有关, 使该区水合物存在指示兼具主动大陆边缘和被动大陆边缘的特征。综合研究区的异常标志分布特征, 推测增生楔中部和西部的背斜脊及其附近区域是天然气水合物远景区。

关键词:莫克兰增生楔; 天然气水合物; 地震识别标志; 地形地貌标志; 水体标志; 矿产勘查工程

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)01-0027-14

Zhang Z, Deng X G, Yao H Q, Yu M, Wang H F, Xiao H Z, Cheng Y. Shallow and submarine identifications of gas hydrate in the Makran accretionary prism, northern Arabian Sea. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 27-40

Abstract: The Makran accretionary prism located in the northern Arabian Sea is formed by the subduction of the Arabian plate beneath the Eurasian plate in a northerly direction at low speed and low angle, and there are abundant gas hydrate resources in the accretionary prism. Based on the high-resolution multi-channel seismic data, sub-bottom profile and multi-beam echo sounding data acquired by China in 2019, combined with the former investigation results, this paper discusses the shallow and submarine identifications of gas hydrate in the Makran accretionary prism. The seismic identifications mainly include bottom simulating reflector (BSR) and acoustic blank zone. The topographic and geomorphic signs include submarine pockmark, submarine slump, mound, mud volcano and cold seeps system. The water body signs mainly is flare. Gas hydrate samples have been drilled at the stations with water depth of 1000 m and 2900 m respectively. The abundant hydrate identifications of Makran accretionary prism may be related to the low velocity and low angle subduction geological background, which makes the hydrate identifications in this area show the characteristics of active continental and passive continental margins. Based on the distribution characteristics of identifications in the study area, the anticlinal ridges and

收稿日期:2020-11-10; **修订日期:**2021-05-20

资助项目:中国地质调查局项目《阿拉伯海天然气水合物资源探查》(编号:DD20190582)、《***重点海域战略性矿产资源评价》(编号:DD20191009)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项《西太平洋富稀土沉积物、富钴结核成矿机制及其时空关系研究》(编号:GML2019ZD0106)

作者简介:张振(1989-), 女, 博士, 工程师, 从事天然气水合物资源调查研究。E-mail: zhangzhenhnp@163.com

*** 通信作者:**邓希光(1968-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋资源调查研究。E-mail: dengxg68@163.com

their adjacent areas in the central and western parts of accretionary prism are the gas hydrates prospective areas.

Key words: Makran accretionary prism; gas hydrate; seismic identification; topographic and geomorphic sign; water body sign

天然气水合物是一种高效清洁的新能源,分布广、规模大,是未来的理想替代能源,在主动大陆边缘和被动大陆边缘的多种构造地质体区域都有分布。阿拉伯海北部的莫克兰增生楔是典型的主动大陆边缘环境的产物,东部以默里脊为界与印度板块的印度河扇相接,西部以霍尔木兹海峡为界与波斯湾相接,两侧均为油气的重要产出区域,特别是波斯湾盛产油气。然而,迄今为止在莫克兰增生楔的天然气水合物资源勘查仍没有重大突破。

莫克兰增生楔以其特殊的地理位置及丰富的水合物资源受到广泛关注。1993 年和 1997—1998 年巴基斯坦联合德国开展的“Sonne”号调查航次、2007 年德国开展的“Meteor”号调查航次,以及 2018—2019 年中国地质调查局广州海洋地质调查局实施的中巴联合航次都在巴基斯坦莫克兰海域发现了丰富的流体逸散活动及水合物存在的证据(von Rad et al., 2000; Kukowski et al., 2001; Bohrmann et al., 2008; Römer et al., 2012; Zhang et al., 2020; 2021),而且 2007 年德国在水深 1000 m 和 2900 m 的 2 个站位分别获取了水合物样品(Bohrmann et al., 2008),粗略估算巴基斯坦外海莫克兰地区水合物的分布区长 200 km、宽 100 km、厚 600 km。针对莫克兰增生楔水合物的分布与成藏特征亦有相关研究,Grando et al. (2007)对伊朗莫克兰增生楔的形态特征及构造样式进行了研究,提出“二层楼结构”的水合物成藏模式,即深部主要受逆冲断层控制,浅部主要受正断层控制;Smith et al. (2012)和龚建明等(2016)分析构造作用是莫克兰增生楔天然气水合物的主控因素;Zhang et al. (2020)对巴基斯坦莫克兰增生楔的底辟构造进行了分析,认为泥底辟、泥火山、气烟囱构造与逆冲断层是气体运移的主要通道,对水合物的成藏与分布起重要控制作用。

本文依据 2019 年中国地质调查局广州海洋地质调查局“海洋地质十号”调查船在莫克兰增生楔海域采集的高分辨率多道地震资料、浅地层剖面及多波束测深数据,结合以往的调查成果,在莫克兰海域识别出天然气水合物赋存的地震识别标志、地形地貌识别标志、水体标志等多种浅表层标志,探

讨其特征及其与水合物的相关性,为寻找高饱和度的水合物藏提供依据,为未来水合物勘探开发提供基础资料。

1 区域地质背景

莫克兰增生楔位于阿拉伯海北部,地处欧亚板块、阿拉伯板块和印度板块的交汇处(图 1),是阿拉伯板块以低速(约 4 cm/a)、低角度($<3^\circ$)北向俯冲到欧亚板块之下形成的主动陆缘构造(Demets et al., 2010),是世界上最宽最复杂的增生楔(Gutscher et al., 2009)。晚白垩世阿拉伯板块开始发生俯冲(Arthuron et al., 1982; Ellouz-Zimmermann et al., 2007),而增生大约开始于始新世(Byrne et al., 1992)。增生楔呈东西向展布,水深 200~3500 m,水深等值线与海岸线大致平行。莫克兰增生楔由狭窄的陆架、宽阔的陆坡和变形前缘构成(Grando, 2007),陆坡可划分为上陆坡、中陆坡和下陆坡(图 2),下陆坡最显著的特点是发育系列向海收敛的叠瓦状逆冲断层,变形前缘位于下陆坡与深海平原之间。东西向的逆冲断层呈现出由南向北、由西向东活动性逐渐减弱的变化趋势(Smith et al., 2012)。控制增生楔发育东西向的背斜脊(anticlinal ridge)有 7 个,最年轻的为最南边的初生脊,脊与脊之间为背驮式盆地(Ellouz-Zimmermann et al., 2007)(图 2)。

莫克兰增生楔从渐新世开始发育,中更新世以来其近岸部分经历了隆升和伸展断陷阶段,但水下部分一直保持加积,增生楔后缘发生构造抬升,为增生前缘提供了物质基础(廖晶等, 2019)。增生楔沉积了渐新统、中新统、上新统和第四系等,最大沉积厚度达 7 km 以上(Grando, 2007; Kopp et al., 2000)。渐新世—中新世为深水沉积环境,表现为下部以泥质沉积为主,上部为砂岩夹泥岩沉积;晚中新世地层与逆冲断层同沉积发育,表现为多个背驮式洼陷沉积相连,发育粉砂质沉积;上新世—第四纪为典型陆架—陆坡沉积,表现为半远洋泥质和浊流发育(廖晶等, 2019)。研究区地层下部以泥质沉积为主,上部以砂质为主,呈现出密度倒置,且自上新世以来沉积速率较高(沉积速率高达 400 m/Ma (Abid et al., 2015))。

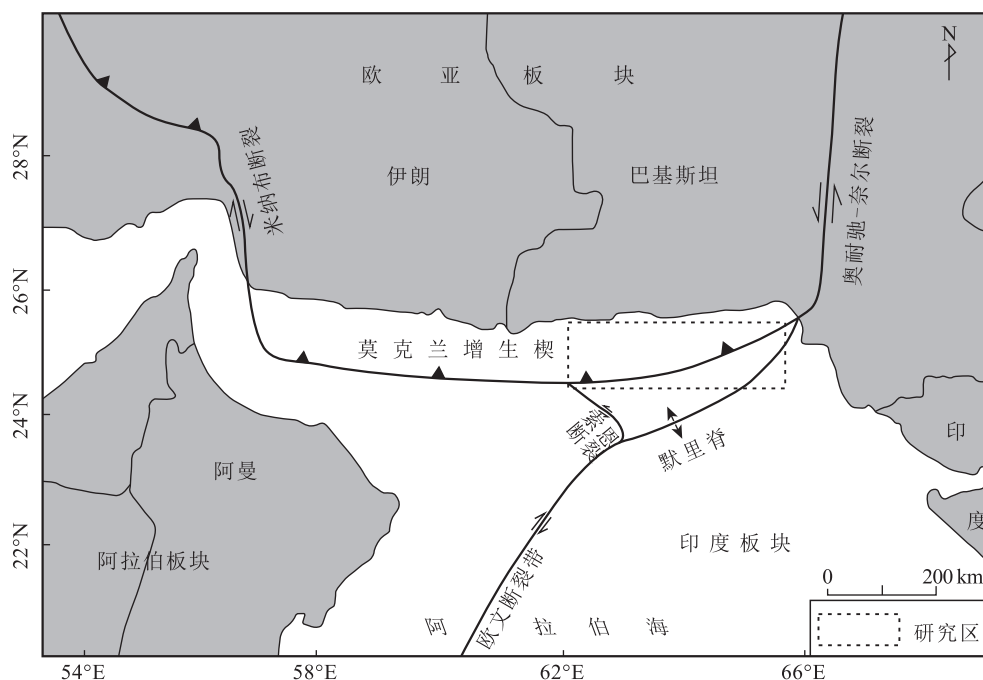


图 1 莫克兰增生楔大地构造位置(据 Kukowski et al., 2001)

Fig. 1 Tectonic map of the Makran accretionary prism

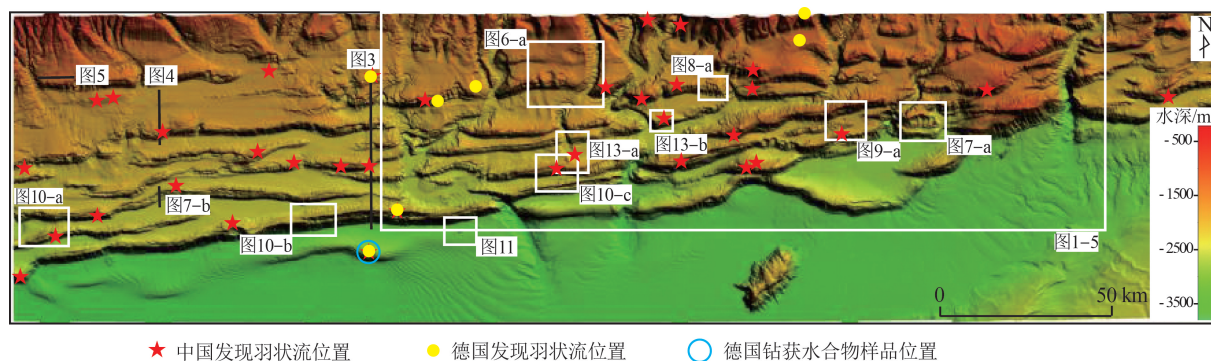


图 2 莫克兰增生楔构造图(图中德国发现羽状流位置和钻获水合物样品位置据 Bohrmann et al., 2008)

Fig. 2 Structure map of the Makran accretionary prism

2 水合物存在的浅表层标志

综合高分辨率多道地震资料、浅地层剖面及多波束测深数据,在莫克兰增生楔识别出天然气水合物存在的多种标志,包括地震识别标志、地形地貌识别标志及水体标志,地震识别标志主要有似海底反射层(BSR)和振幅空白带 2 种标志,地形地貌标志包括海底麻坑、海底滑塌、丘状体、泥火山、冷泉系统等,水体标志主要为羽状流。下面分别对其进行详细描述和讨论。

2.1 地震识别标志

2.1.1 似海底反射层(BSR)

似海底反射层——BSR (Bottom Simulating Reflector) 是一个速度异常变化界面,其上的水合物富集层声波传播速度快,其下的游离气层声波速度慢,是地震波在水合物层与游离气层之间形成的一个波阻抗差较大的物理界面(张伟等, 2020),表现为强地震反射。BSR 在地震剖面上通常呈现与海底近似平行、速度异常、极性反转、高振幅的反射特征(Xu et al., 2007),在构造活跃的主动大陆边缘多

表现为与沉积地层斜交。BSR 指示为天然气水合物稳定带底界 (Holbrook et al., 1996; 张伟等, 2020), 是目前识别海域天然气水合物最主要、最有效的地球物理标志 (Kvenvolden et al., 2001; Majumdar et al., 2016)。但值得注意的是, BSR 与水合物并不是一一对应关系。

莫克兰海域发育典型的增生楔控制型 BSR, 分布广泛, 面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要处于水深 1200~3375 m, 位于海底以下 315~675 m。增生楔控制型 BSR 分布于叠瓦状逆冲断层控制的下陆坡区域, 呈现平行海底、连续分布、与沉积层斜交的特征 (图 3)。BSR 受构造活动控制明显, 随着断层活动由南向北呈现出振幅减弱、连续性变差的变化趋势, 这可能是由于南部断裂活动强, 构造隆升导致水合物分解, 在稳定带底部富集大量的游离气, 导致 BSR 特征清晰且连续。对于单个背斜脊, 在逆冲推覆背斜相对高部位 (背斜向陆一侧), BSR 振幅较强, 且连续性较好, 划分为强 BSR (S-BSR); 在逆冲推覆背斜相对低部位 (背斜向海一侧), BSR 振幅较弱, 连续性变差, 划分为弱 BSR (W-BSR) (图 3-b), 这主要与两翼不对称的沉积堆积、剥蚀作用及水合物的再循环生成有关。在 BSR 之上出现多处强振幅反射 (图 3-c、d), 指示可能存在高饱和度的水合物藏 (Noguchi et al., 2011)。

2.1.2 振幅空白带

振幅空白带是水合物与沉积物的均匀混合致使 BSR 之上的反射振幅减弱而出现的一种现象 (Dillon et al., 1993; Xu et al., 2007), 其在天然气水合物沉积物中连续出现, 最主要的特征为较正常海底沉积层的振幅较弱、层速度略高。一般反射振幅强弱与水合物含量呈反比, 即反射振幅越弱, 空白程度越高, 反映沉积层中水合物含量越高 (Shipley et al., 1979)。振幅空白带并不总是与水合物相关, 其可能由多种因素引起, 比如沉积环境等。通常将 BSR 与空白带的伴生现象作为识别天然气水合物的重要地震指示标志 (王后金等, 2013)。

在莫克兰增生楔的浅地层剖面和地震剖面上观察到大量的振幅空白带现象 (图 4、图 5), 多呈补丁状, 也有带状分布。浅层地震剖面上发现的振幅空白带, 可能与浅部断层对应, 指示了浅部气体垂向渗漏的通道。在振幅空白带的上方一般发育有麻坑构造, 同样指示可能发生了气体渗漏。图 4 中

的振幅空白带与 BSR 相伴生, 呈补丁状, 内部没有反射信号, 外部邻近地层反射能量增强, 边界呈突变接触关系, 形状与逆冲断层大致一致, 反映气体顺断层或断层引起的构造薄弱带向上运移。图 5 中的振幅空白带呈不规则带状分布, 厚度相对稳定, 厚约 180 m, 在对应海底位置出现 2 处麻坑构造, 反映地层中可能存在厚度较大的天然气水合物层, 且发生过气体泄漏。

2.2 地形地貌识别标志

2.2.1 海底麻坑

麻坑是海底流体 (热液、地下水和烃类气体等) 通过运移通道在海底快速喷逸或缓慢渗漏, 或浅部气体逃逸带走海底沉积物, 使海底发生塌陷而形成的凹坑 (Hovland et al., 1988; Webb et al., 2009), 与海底滑塌也有一定关系 (Pilcher et al., 2007)。海底麻坑呈圆形、椭圆形、新月形、拉长形、彗星形、不规则形等, 表现为独立分布或成群成簇出现 (Hovland et al., 1988; 2010); 规模差异较大, 直径从数米到数千千米; 剖面形态各异, 通常呈“U”形、“V”形或“W”形 (Judd et al., 2007)。

在莫克兰增生楔发现数十个海底麻坑, 呈圆形、半圆形、新月形、拉长形、彗星形及不规则形, 有的表现为独立分布, 有的表现为复合或链状的组合分布。麻坑平面直径在 170~4260 m 之间, 最大达 8200 m, 坑深 7~456 m。麻坑主要分布在陆坡的背斜脊上。图 6-a 展示了分布在水道一侧的圆形麻坑和分布在背斜脊上的半圆形麻坑, 5 个圆形麻坑的直径分别为 1599 m、971 m、2050 m、1586 m、1970 m, 对应坑深 53 m、68 m、46 m、44 m、77 m; 3 个半圆形麻坑的直径从左向右依次为 2350 m、4260 m、3310 m, 坑深 184 m、256 m、74 m。受中间麻坑影响, 外侧圆形麻坑形状不完整 (图 6-a)。半圆形麻坑可能是圆形麻坑在背斜脊顶部的一种特殊表现形式。地震剖面显示麻坑形态多呈近“U”或“V”字形分布 (图 4、图 5、图 6-b), 通常其下部为具有渗漏路径的断层/气烟囱/泥底辟等气体运移通道。在地震剖面上观察到呈近“V”字形的麻坑构造 (图 6-b), 其下部发育清晰连续的 BSR 反射和正断层构造, 说明该区气源充足, 气体顺断层运移至浅层可能形成天然气水合物, 水合物分解释放的气体及深部气体继续运移至海底发生渗漏, 也进一步指示了麻坑的气体渗漏成因。

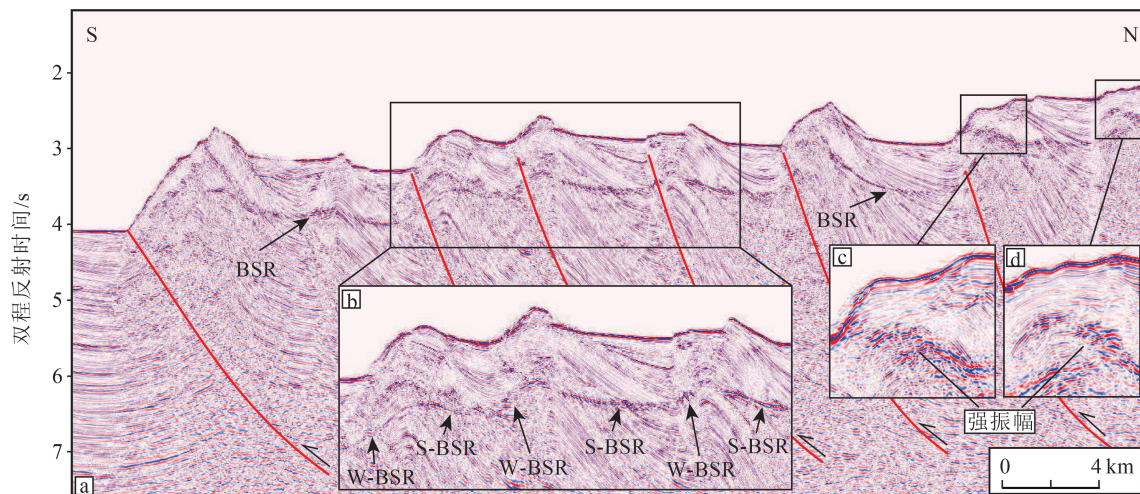


图 3 莫克兰增生楔 BSR(似海底反射层)特征

Fig. 3 BSR characteristics in the Makran accretionary prism

a—增生楔控制型 BSR;b—背斜脊向陆一侧发育 S-BSR(强 BSR),向海一侧发育 W-BSR(弱 BSR);c、d—BSR 之上发育强振幅反射

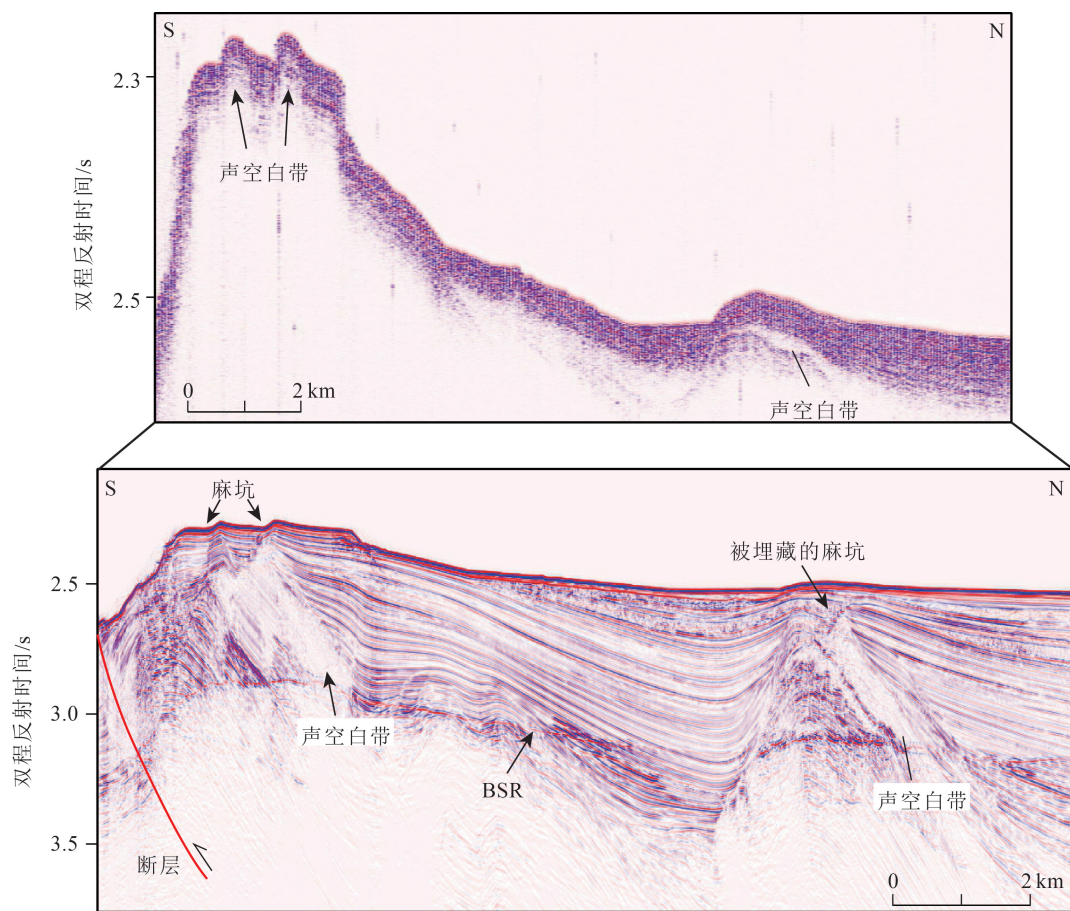


图 4 浅地层剖面及对应地震剖面上的补丁状声空白反射特征

Fig. 4 Characteristics of patchy blanking reflection on sub-bottom and seismic profiles

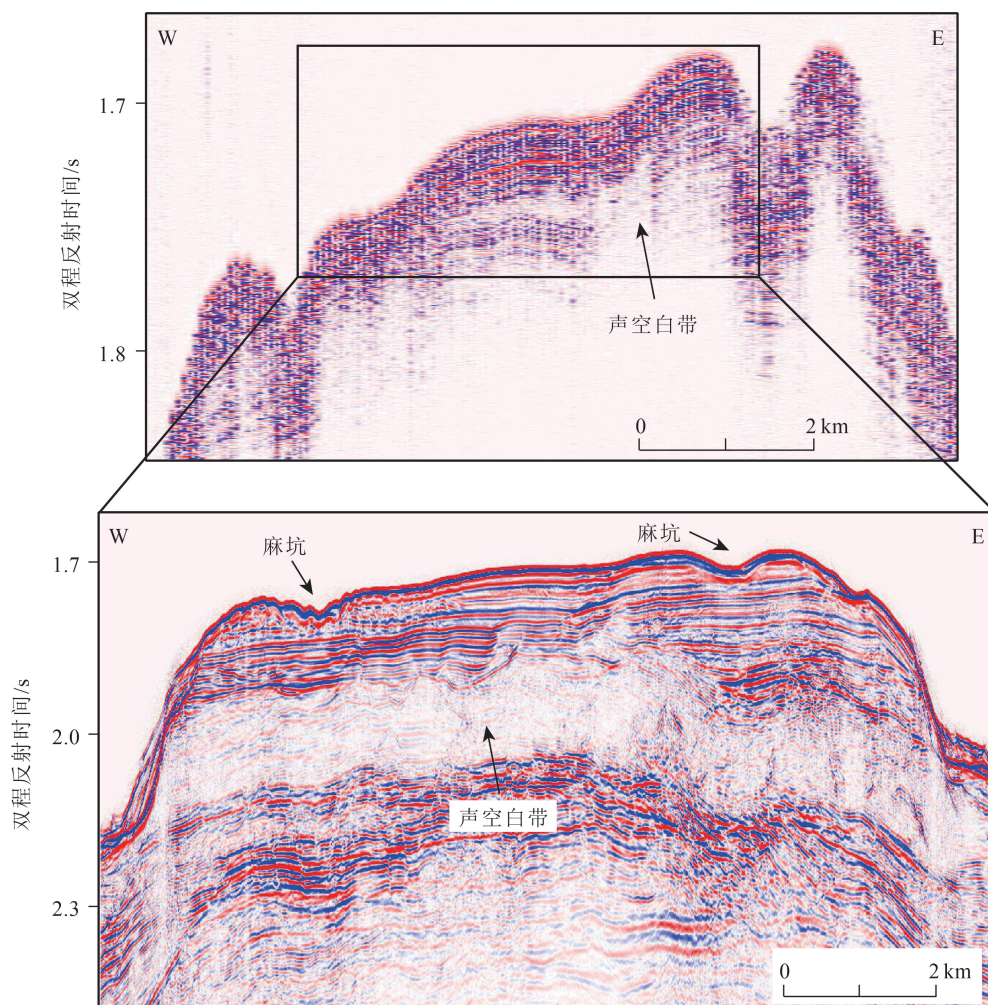


图 5 浅地层剖面及对应地震剖面上的带状声空白反射特征

Fig. 5 Characteristics of banding blanking reflection on sub-bottom and seismic profiles

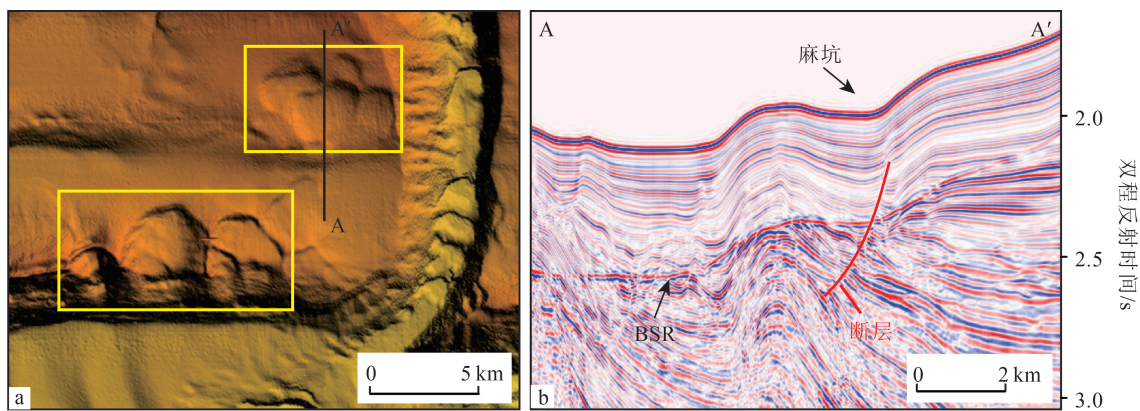


图 6 海底麻坑特征

Fig. 6 Characteristics of submarine pockmarks

2.2.2 海底滑塌

滑塌构造可为天然气水合物的形成提供适宜的场所,可能是气体水合物分解而形成的(张光学等,2006;Xu et al., 2007)。研究表明,相当一部分海底滑塌与水合物的失稳分解有关。滑塌产生的BSR 多位于滑塌体内或与滑移面重合,规模较大,呈不连续或突变状,水合物主要聚集在BSR 之上的相对狭窄地带(张光学等,2006;龚跃华等,2009)。

莫克兰增生楔背斜脊向海一侧多处发生滑塌构造,滑移距离多在2000~3500 m 之间,最远达5800 m。图7-a 地形图上为背斜脊南侧发生的断崖式滑塌,规模较大,形成了多个近椭圆形塌陷,总长度约11 km。图7-b 地震剖面中背斜脊南侧发生滑塌,滑塌区下部地层中观察到较弱BSR 反射,并且在该滑塌背斜脊顶部观察到清晰的气体渗漏现象,说明滑塌区天然气水合物气源充足,在滑塌体

内部或与滑移面重合位置没有BSR,推测该处滑塌可能是水合物分解而形成的。多个拉长形麻坑在背斜脊顶部呈雁列状分布(图8-a),在对应地震剖面(图8-b)上,可以看到麻坑下方发育断层和气泡构造,可能为此处的天然气水合物发生分解导致较大规模气体泄漏,加上底流活动、构造运动、重力作用等的影响,形成的拉长型麻坑逐渐扩大,并在背斜脊的向海一侧演化为规模较大的海底滑塌(图8-a)。

2.2.3 丘状体

海底丘状体是水合物在浅表层发生局部沉积物体积膨胀而形成的海底低起伏地貌(Hovland et al., 2006;Paull et al., 2008),在天然气水合物发育区是一种常见的微地貌,可作为高通量流体运移的识别标志(匡增桂等,2018)。在多波束地形图和地震剖面上呈与麻坑相反的结构特征,表现为局部的正地形,高出海底几米到上百米。Serié et al.(2012)

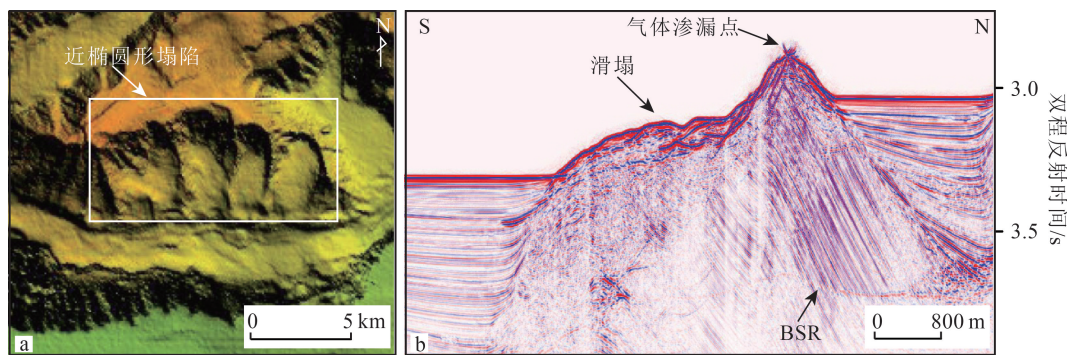


图7 海底滑塌特征

Fig. 7 Characteristics of submarine slump

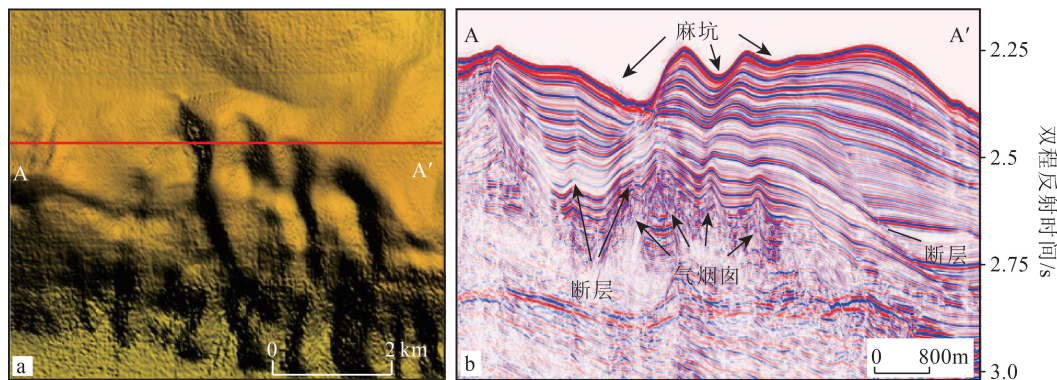


图8 拉长形海底麻坑演化为海底滑塌

Fig. 8 The elongated submarine pockmarks evolved into submarine slump

总结了水合物丘的 4 个特征:①外表呈丘状;②与泥火山不同,其下无明显喷发通道;③表现为侵入构造,海底反射没有延伸至丘状体内部;④具有非常浅的 BSR。

在莫克兰增生楔脊与脊之间的宽阔背驮式盆地中发育多个丘状体(图 9-a),最大的一个呈近椭圆状,长轴 3.75 km,高 100 m,在其周围分布多个小丘状体,长轴平均 948 m,高度平均 35 m。并在该位置附近观察到清晰的羽状流现象,进一步证明海底丘状体与浅层水合物形成及气体渗漏作用有关。在地震剖面上观察到丘状体内部呈弱振幅反射,下部无垂向喷发通道,在浅部发育较短的 BSR 反射(图 9-b),反映在 BSR 之上的沉积层中可能存在水合物。

2.2.4 泥火山

海底泥火山是一种重要的、广泛分布的流体逸散系统,常呈圆丘状凸起于海底,高度可达数百米,宽度可达数千米。其形成与烃类渗出物有关,并与断裂关系十分密切(方银霞等,2005)。一般而言,有 BSR 伴生的泥火山地区往往有水合物产出(刘杰

等,2015)。全球范围内水合物成藏模式及钻探资料表明(Milkov,2000;沙志彬等,2005),气体从深部运移至浅层的快速冷却作用往往导致在泥火山四周形成水合物,因此泥火山型水合物多围绕该类构造呈环带状分布,可以说泥火山是水合物存在的活证据(张旭东等,2021)。

研究区共发现 22 处泥火山,其中 20 处出露在背斜脊上,2 处出露在变形前缘。这些泥火山外部形态多样,有顶部上凸的圆锥状(图 10-a),有顶部平坦型(图 10-b 左),有顶部下凹的塌陷型(图 10-b 右),有顶部近圆丘型(图 10-c)或穹隆状(图 11)。圆锥状泥火山翼部较陡,其他形状泥火山翼部相对较缓。虽形态多样,但都呈现出近于对称,直径 1~1.7 km,高出海底 20~150 m,多数泥火山顶部周围呈现环带状凹陷,部分泥火山对应背斜脊的向海一侧发生滑塌构造(图 10)。在 5 处泥火山的海底位置观察到气体渗漏现象,可能是泥火山内部物质的运移及其喷发造成天然气水合物分解,导致甲烷气体渗漏至水体。

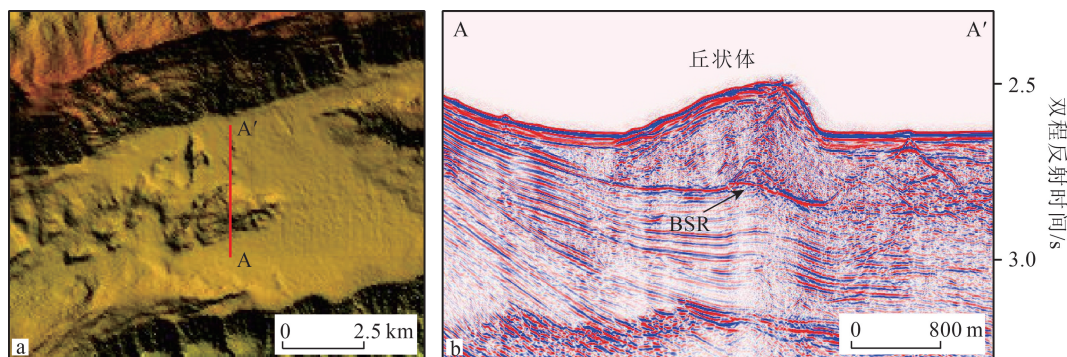


图 9 海底丘状体特征

Fig. 9 Characteristics of submarine mounds

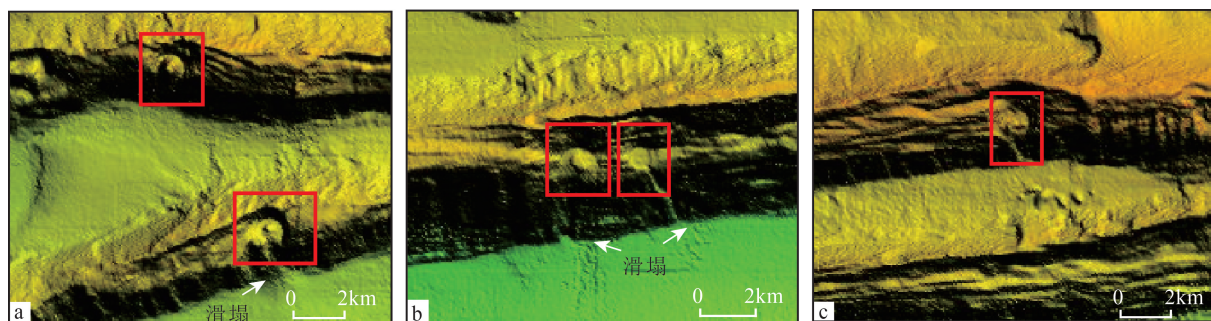


图 10 下陆坡泥火山的海底地貌特征

Fig. 10 Characteristics of submarine topography of mud volcanoes in the lower-continental slope

Wiedicke et al. (2001) 通过高分辨率地震资料对变形前缘的泥火山进行分析,该处泥火山在地貌图上表现为穹隆状,直径约 1.7 km,高出正常海底约 50 m,在地震剖面上表现为突出海底的锥状构造,泥火山内部的反射空白带为运移通道,从下向上通道宽度逐渐变窄(图 11)。该泥火山及其附近沉积物中甲烷浓度高达 40000 ng/g,表明研究区气源充足。

2.2.5 冷泉系统

海底冷泉作为一种气体渗漏现象,通常伴随自生碳酸盐岩、生物群落、泥火山与麻坑等地质现象(Foucher et al., 2009; Vanreusel et al., 2009)。当外力作用导致海底之下的稳定温压条件改变时,天然气水合物发生分解释放的甲烷气体向上运移并渗漏至海底,形成甲烷冷泉(Campbell et al., 2006)。因此冷泉一般与天然气水合物的分解密切相关,可以作为海底沉积层中可能存在于水合物的标志。

2019 年中国的“海洋地质十号”调查船在莫克兰增生楔海域发现 5 处冷泉系统及其伴生的碳酸盐岩与生物群落等。调查区碳酸盐岩大量分布,大小不一,形态各异,由自生碳酸盐和钙质生物壳体组成,局部上覆少量白色菌席(图 12-a),或与冷泉生

物共生(图 12-b),其形成多与浅层水合物分解及甲烷渗漏、浅层硫酸盐还原反应等一系列生物化学作用相关,属于典型的冷泉成因碳酸盐岩。此外,在不同的气体渗漏站位还发现活体贻贝、甲壳类(图 12-c)、蠕虫类等生物群落,组成不同活动状态的冷泉系统。当冷泉区气源充足时,在冷泉上方海水中将会产生气泡羽状流(图 12-d)。莫克兰海域规模较大的冷泉系统指示海底可能广泛发育天然气水合物。

2.3 水体标志

在地壳动力作用下,天然气通过断裂、裂缝或孔隙等通道从深部向浅层运移,并在海底渗漏至水体,形成气泡羽状流(樊栓狮等, 2007),高度从几十毫米到几十米不等,甚至可达上千米。天然气水合物分解释放的大量甲烷气体以气泡形式进入水体形成甲烷气泡羽状流,因此羽状流是指示流体活动及水合物富集的重要标志。

莫克兰增生楔北部物源供给充足,输入高流量泥沙,有机质丰富,微生物降解作用形成富含甲烷的烃类气体储存在沉积地层中,并在适宜的温压条件下形成天然气水合物。在逆冲断裂挤压推覆作用下,沉积层褶皱变形形成背斜脊。随着挤压作用

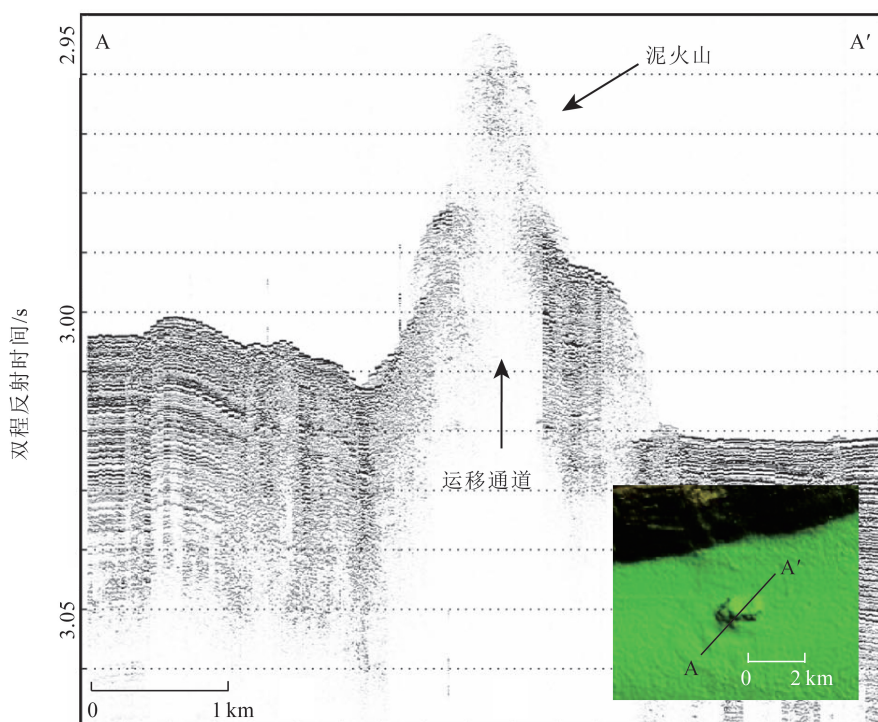


图 11 变形前缘的泥火山特征(地震剖面据 Wiedicke et al., 2001)

Fig. 11 Characteristics of mud volcano in the deformation front

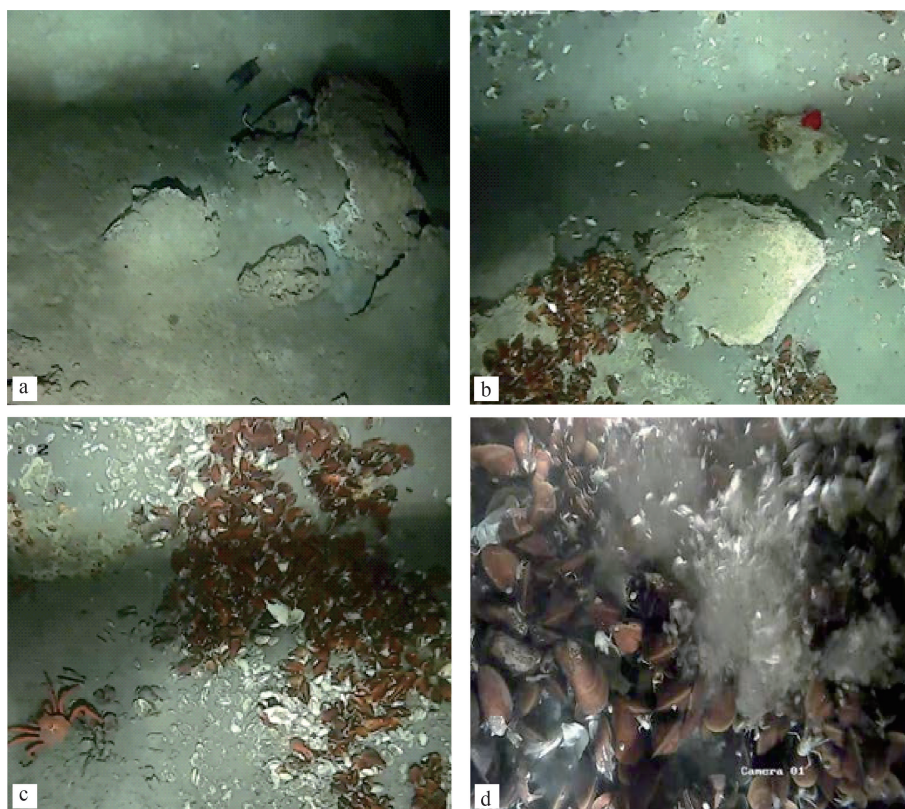


图 12 莫克兰海域冷泉及其伴生碳酸盐岩与生物群落

Fig. 12 Cold seeps and associated carbonate rocks and biological communities of the Makran accretionary prism

a—碳酸盐岩局部上覆白色菌席;b—碳酸盐岩与冷泉生物共生;c—气体渗漏站位附近的活体贻贝、甲壳类生物;d—气泡羽状流

不断增强,背斜脊顶部张应力逐渐增大,最终达到沉积物的破裂极限,浅地层结构遭受破坏,水合物发生分解释放的气体沿着系列断裂及构造薄弱带向海底运移,并渗漏至水体形成羽状流。

2019 年,中国在莫克兰海域发现了 35 处羽状流(羽状流位置见图 2),位于水深 825~2865 m,高度 280~1490 m。2007 年,德国流星号调查船

(Meteor R/V) 在研究区发现了 15 处羽状流(羽状流位置见图 2)。由于本文研究区未能全部覆盖 2007 年的调查区,所以在本文研究区以外的羽状流未能在图 2 中列出),位于水深 200~2871 m,高度 50~1800 m 处。在多波束水体影像资料中观察到羽状流群(图 13-a)和单喷发羽状流(图 13-b);在海底摄像资料中可以清晰地观察到气泡不断向上流出(图

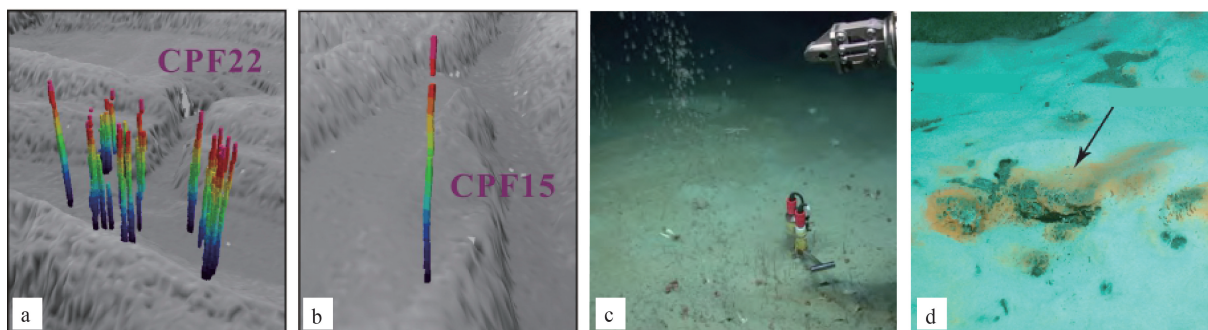


图 13 莫克兰增生楔羽状流现象(c、d 据 Bohrmann et al., 2008)

Fig. 13 Still imaged of the flares in the Makran accretionary prism

a—羽状流群;b—单喷发羽状流;c—气泡从海底不断向上流出;d—羽状流及其附近伴生的菌席

13-c),在部分羽状流位置有伴生的菌席等(图 13-d)。这些羽状流主要分布于背斜脊顶部,在海底位置及附近多见海底滑塌、丘状体、泥火山、生物群落等现象。德国发现的羽状流中有 4 处在本次观测时仍处于活跃状态,可能是天然气水合物缓慢分解不断释放甲烷气体,也可能是深部气体的持续泄露。丰富的羽状流系统反映研究区气源充足,对应海底位置可能有天然气水合物富集。

2019 年中国地质调查局广州海洋地质调查局“海洋地质十号”调查船在研究区进行了地质调查取样工作,仅钻取浅表层沉积物,未钻获水合物样品。2007 年德国流星号调查航次在研究区的 Flare2 站位和 Flare5 站位分别钻获水合物样品(Bohrmann et al., 2008)。在 Flare2 站位钻取管状水合物和气泡状水合物(图 14-a),该站位水深 1000 m,在海底表面观察到分布广泛的菌席、管状蠕虫、碳酸盐岩结壳、顶部滑塌及高度 170 m 的甲烷羽状流。在 Flare5 站位(图 2 中蓝圈标注)钻取水合物分解形成的粥状沉积物及片状水合物碎片(图 14-b),该站位水深 2900 m,在海底观察到甲壳类、菌席、管状蠕虫等生物,以及高度 1800 m 的甲烷羽状流。

通过上述分析认为,莫克兰增生楔多样的天然气水合物浅表层识别标志与水合物有直接或间接关系,在水合物勘探中具有重要指导意义。

3 讨 论

3.1 与其他主动大陆边缘对比

世界范围内其他主动大陆边缘水合物的存在指示统计如表 1 所示。从表 1 看出,多数主动大陆边缘水合物的存在指示为 BSR,也有区域发现了冷泉、泥底辟、泥火山等水合物的指示标志,而莫克兰增生楔具有典型的增生楔控制型 BSR、振幅空白带、海底麻坑、海底滑塌、丘状体、泥火山、冷泉系统、羽状流等丰富的水合物指示标志,兼具了主动大陆边缘和被动大陆边缘(被动大陆边缘水合物的存在指示有 BSR、空白带、泥火山、底辟构造、生长断层、丘状体、甲烷喷口等(胡高伟等,2020))的部分特征,这可能是由于阿拉伯板块向欧亚板块的低速(约 4 cm/a)、低角度(<3°)俯冲导致的。低速、低角度的俯冲导致莫克兰增生楔形成了宽阔的陆坡和变形前缘。上陆坡、中陆坡、下陆坡倾角分别约 7°、1°、1°~2°,宽度分别为 40 km、15~20 km、

50~60 km(龚建明等,2018),宽缓的地形环境为泥火山、泥底辟等构造的发育提供了良好条件。而且研究区沉积物厚度大、地层密度倒置、沉积速率高等地层特征,为底辟构造的发育提供了良好的物质基础。加上区域走滑断裂发育(Platt et al., 1988; Grando et al., 2007)等构造特征,使莫克兰增生楔成为泥火山最发育的地区之一(Delisle et al., 2002)。

同时,低角度俯冲形成的逆冲断裂为深部物质向上运移提供了侧向挤压应力,使深部气体沿断裂向上运移,在逆冲断裂顶部的背斜脊上及其附近形成水合物。水合物分解释放的甲烷气体及深部气体继续向上运移至海底发生渗漏,导致在海底形成冷泉系统、羽状流等。持续的气体泄漏带走海底沉积物,导致了海底麻坑的形成。由北向南断裂活动逐渐增强,稳定温压条件遭受破坏导致天然气水合物分解,加上底流活动、重力作用等的影响,导致背斜脊的向海一侧更容易发生滑塌构造。

综上所述,莫克兰增生楔特殊的构造环境使该区发育多种水合物存在的浅表层识别标志,也指示研究区水合物资源潜力较大。

3.2 莫克兰增生楔不同地区异常标志分布差异性分析

莫克兰增生楔东部汇聚速率较西部稍快(Kukowski et al., 2001),东部上覆沉积物厚度较西部大(Smith et al., 2012),东西向逆冲断层的活动性由南向北、由西向东呈现出逐渐减弱的变化趋势,导致增生楔背斜脊表现为北部分布较宽缓、南部分

表 1 主动大陆边缘主要水合物分布区的水合物存在指示
(据胡高伟等,2020)

Table 1 Occurrence indicator of hydrate in major hydrate distribution areas of active continental margin	
水合物分布区	水合物存在指示
日本 Nankai 海槽	存在大面积的 BSR
南极海南设得兰海沟	沟-增生楔-弧前盆地序列发育、存在 BSR
智利西海岸和智利三联点附近	增生楔浅部存在 BSR
南太平洋秘鲁海沟增生楔	存在连续 BSR
Cascadia 俯冲带及增生楔	增生楔顶部有明显的、较连续的强反射层 BSR
台湾碰撞带西南近海增生楔	存在 BSR
西北太平洋大陆边缘鄂霍茨克海	冷泉、泥底辟、泥火山

布较紧密,西部分布较宽缓、东部分布较紧密的特征(图 2)。

BSR 受构造活动控制明显,随着断层活动由南向北不断减弱,BSR 由南向北也呈现出振幅减弱、连续性变差的变化趋势,由西向东也呈现出相似的变化趋势。海底麻坑主要分布在研究区中部和东部的中—上陆坡背斜脊上(图 15,位置见图 2),是深部气体顺深部逆冲断层和浅部正断层及泥火山等底辟构造向上运移,并在海底发生泄漏形成的。泥火山在下陆坡南部背斜脊上和变形前缘发育(图 15),是由于逆冲断裂活动南部较强,有利于下部高压流体向上运移并刺穿海底从而形成泥火山。

2007 年德国发现的羽状流多位于上陆坡和中陆坡的背斜脊上,2019 年中国发现的羽状流主要分布于下陆坡和中陆坡的背斜脊上,而且羽状流从西向东活动减少(图 2),可能与断裂构造活动、沉积作用等因素有关。研究区物源来自北部,向南背斜脊顶部及变形前缘上覆沉积物厚度较小,压力减小,而且增生楔逆冲断裂活动南部较强,从而利于下部

流体沿断裂向上运移并在海底形成羽状流。所以增生楔整体表现出羽状流向南移动的趋势。

莫克兰增生楔不同地区的异常标志分布有差异,但结合构造、沉积等因素,认为研究区中部和西部的背斜脊上及其附近区域是天然气水合物远景区。

4 结 语

莫克兰增生楔海域天然气水合物存在多种地震识别标志、地形地貌标志及水体标志:①发育典型的增生楔控制型 BSR,面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要处于水深 1200 ~ 3375 m,位于海底以下 315 ~ 675 m;②BSR 之上发育补丁状和带状声空白反射;③在莫克兰增生楔发现数十个海底麻坑,平面形态多样,表现为独立分布或组合分布,剖面形态多呈近“U”或“V”字形分布;④背斜脊向海一侧多处发生滑塌构造,有的为麻坑演化而成;⑤背驮式盆地中发育多个丘状体;⑥莫克兰增生楔海域共发现 22 处泥火山,其中 20 处出露在背斜脊上,多数泥火山顶

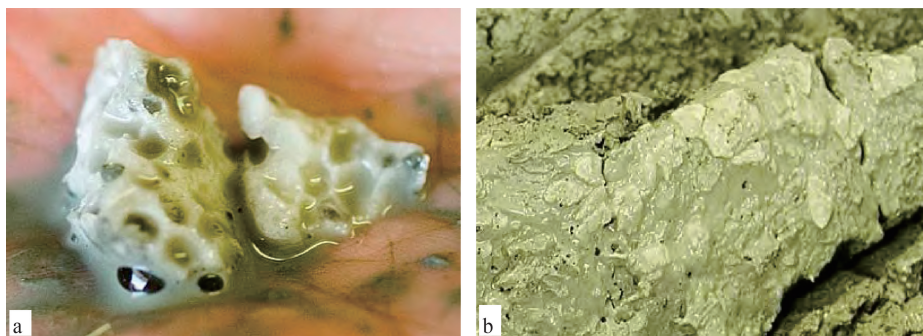


图 14 莫克兰增生楔钻获的气泡状水合物样品(a)和片状水合物碎片(b)(据 Bohrmann et al., 2008)

Fig. 14 The bubble fabric gas hydrate samples(a) and platy gas hydrate pieces(b) from the Makran accretionary prism

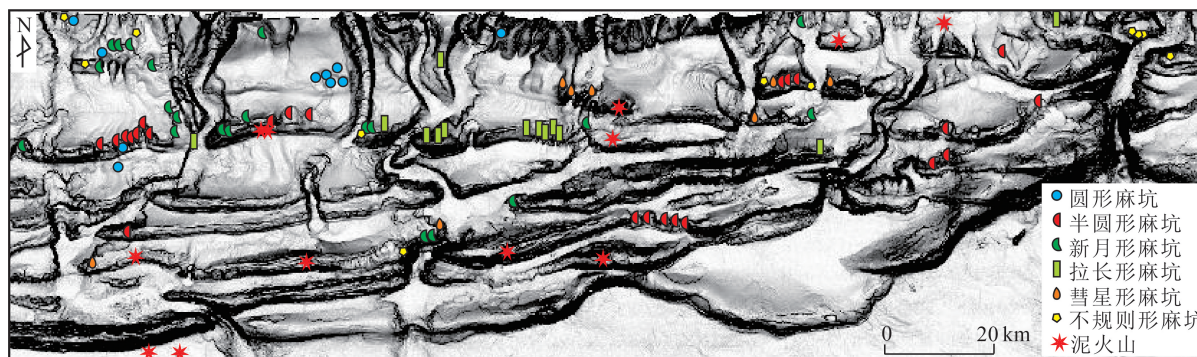


图 15 莫克兰增生楔中部和东部麻坑、泥火山平面分布图

Fig. 15 Plane distribution map of pockmarks and mud volcanoes in the central and eastern parts of the Makran accretionary prism

部周围呈现环带状凹陷;⑦发现 5 处冷泉系统;⑧最新调查发现 35 处羽状流,主要分布于背斜脊顶部。在水深 1000 m 和 2900 m 的站位已分别钻获天然气水合物样品。通过浅表层标志及水合物钻取结果,初步判断莫克兰增生楔天然气水合物分布广、埋深浅。在研究区这些识别标志与天然气水合物具有直接关系或间接相关,可以为未来天然气水合物勘探和开发提供基础资料。

莫克兰增生楔丰富的水合物识别标志可能与低速、低角度的俯冲地质背景有关,使该区的水合物表现出兼具主动大陆边缘和被动大陆边缘的特征。综合研究区内的异常标志分布特征,增生楔中部和西部的背斜脊上及其附近区域是天然气水合物远景区。

致谢:感谢中国地质调查局广州海洋地质调查局“海洋地质十号”船全体科考人员在航次期间的辛苦工作。感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- Abid H, Moin R K, Nadeem A, et al. Mud diapirism induced structuration and implications for the definition and mapping of hydrocarbon traps in Makran accretionary prism, Pakistan [C]//Washington: AAPG/SEG International Conference & Exhibition, 2015: 13-16.
- Arthuron R S, Farah A, Ahmed W. The late Cretaceous-Cenozoic history of western Baluchistan, Pakistan-the northern margin of the Makran subduction complex [C]//Legett J K. Trench-Forearc geology. Special Publication Geological Society of London, 1982, 10: 373-385.
- Bohrmann G, Bahr A, Brinkmann F, et al. Cold seeps of the Makran subduction zone (continental margin of Pakistan): R/V Meteor cruise report M74/3: M74, Leg 3, Fujairah-Male, 30 October-28 November, 2007 [M]. Berichte, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, No. 266, 2008: 1-161.
- Byrne D E, Sykes L R, Davis D M. Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1992, 97: 449-478.
- Campbell K A. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent palaeoenvironments and palaeontology: past developments and future research directions [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeogeography, 2006, 232 (2/4): 362-407.
- Delisle G, von Rad U, Andruleit H, et al. Active mud volcanoes on- and offshore eastern Makran, Pakistan [J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91: 93-110.
- Demets C, Gordon R G, Argus D F. Geologically current plate motions [J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(1): 1-80.
- Dillon W P, Lee M W, Felhaber K, et al. Gas hydrates on the Atlantic continental margin of the United States-Controls on the concentration [C]//Howell D G. The Feature of Energy Gases. U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, 1993: 313-330.
- Ellouz - Zimmermann N, Deville E, Müller C, et al. Impact of sedimentation on convergent margin tectonics: example of the Makran accretionary prism (Pakistan) [C] // Lacombe O, Roure F, Lavé J, et al. Thrust Belts and Foreland Basins. Springer, France Chapter, 2007, 17: 327-350.
- Ellouz-Zimmermann N, Lallemand S J, Castilla R, et al. Offshore frontal part of the Makran accretionary prism: the Chamak survey (Pakistan) [J]. Frontiers in Earth Sciences, 2007, 18: 351-366.
- Foucher J P, Westbrook G K, Boetius A, et al. Structure and drivers of cold seep ecosystems [J]. Oceanography, 2009, 22(1): 92-109.
- Grando G, McClay K. Morphotectonics domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran [J]. Sedimentary Geology, 2007, 196(1): 157-179.
- Gutscher M A, Westbrook G K. Great earthquakes in slow-subduction, low-taper margins [C]//Lallemand S, Funiciello F. Subduction Zone Geodynamics. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2009: 119-133.
- Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling [J]. Science, 1996, 273: 1840-1843.
- Hovland M, Judd A G. Seabed pockmarks and seepages [M]. London: Graham & Trotman Ltd., 1988.
- Hovland M, Svensen H. Submarine pingoes: indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea [J]. Marine Geology, 2006, 228: 15-23.
- Hovland M, Heggland R, Vries M H D, et al. Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow [J]. Marine & Petroleum Geology, 2010, 27(6): 1190-1199.
- Judd A, Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- Kopp C, Fruehn J, Flueh E R, et al. Structure of the Makransubduction zone from wide-angle and reflection seismic data [J]. Tectonophysics, 2000, 329(1): 171-191.
- Kukowski N, Schillhorn T, Huhn K, et al. Morphotectonics and mechanics of the central Makran accretionary wedge off Pakistan [J]. Marine Geology, 2001, 173: 1-19.
- Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrates [C]//Paull C K, Dillon W P. Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection. USA: AGU Geophysical Monograph, 2001: 3-18.
- Majumdar U, Cook A E, Shedd W, et al. The connection between natural gas hydrate and bottom-simulating reflectors [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(13): 7044-7051.
- Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, 167(1): 29-42.
- Noguchi S, Shimoda N, Takano O, et al. 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. Marine & Petroleum Geology, 2011, 28: 1817-1828.

- Paull C K, Normark W R, Ussler W, et al. Association among active seafloor deformation, mound formation, and gas hydrate growth and accumulation within the seafloor of the Santa Monica Basin, offshore California[J]. Marine Geology, 2008, 250: 258–275.
- Pilcher R, Argent J. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin[J]. Marine Geology, 2007, 244(1/4): 15–32.
- Platt J P, Leggett J K, Alam S. Slip vectors and fault mechanics in the Makran accretionary wedge, Southwest Pakistan[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(7): 7955–7973.
- Römer M, Sahling H, Pape T, et al. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan) [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117 (C10015): 1–19.
- Serié C, Huuse M, Schodt N H. Gas hydrate pingoes: Deep seafloor evidence of focused fluid flow on continental margins [J]. Geology, 2012, 40: 207–210.
- Shipley T H, Houston M H, Buffler R T, et al. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slope and rises[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(12): 2204–2213.
- Smith G L, McNeill L C, Henstock T J, et al. The structure and fault activity of the Makran accretionary prism [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: 1–17.
- Vanreusel A, Andersen A C, Boetius A, et al. Biodiversity of cold seep ecosystems along the European margins[J]. Oceanography, 2009, 22(1): 110–127.
- Von Rad U, Berner U, Delisle G, et al. Gas and fluid venting at the Makran accretionary wedge off Pakistan[J]. Geo-Marine Letters, 2000, 20(1): 10–19.
- Webb K E, Hammer O, Lepland A, et al. Pockmarks in the inner Oslofjord, Norway[J]. Geo-Marine Letters, 2009, 29(2): 111–124.
- Wiedicke M, Neben S, Spiess V. Mud volcanoes at the front of the Makran accretionary complex, Pakistan[J]. Marine Geology, 2001, 172: 57–73.
- Xu Z Z, Chen S Y, Yang S Q, et al. Identification signs and prospects of hydrate gas[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 9(1): 84–96.
- Zhang Z, Deng X G, Yao H Q, et al. A preliminary study on geomorphological characteristics and genetic mechanism of pockmarks in the Makran accretionary prism, northern Arabian Sea[J]. Geo-Marine Letters, 2021, 41(3): 1–16.
- Zhang Z, He G W, Yao H Q, et al. Diapir structure and its constraint on gas hydrate accumulation in the Makran accretionary prism, offshore Pakistan[J]. China Geology, 2020, 3(4): 611–622.
- 樊栓狮, 关进安, 梁德青, 等. 天然气水合物动态成藏理论[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 819–826.
- 方银霞, 高金耀, 黎明碧, 等. 冲绳海槽天然气水合物与地质构造的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 85–91.
- 龚建明, 廖晶, 孙晶, 等. 巴基斯坦马克兰增生楔天然气水合物的主控因素[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(12): 10–15.
- 龚建明, 廖晶, 张莉, 等. 印度洋北部马克兰增生楔泥火山分布及主控因素探讨[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 1025–1030.
- 龚跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 210–216.
- 胡高伟, 卜庆涛, 吕万军, 等. 主动-被动大陆边缘天然气水合物成藏模式对比[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 45–58.
- 匡增桂, 方允鑫, 梁金强, 等. 珠江口盆地东部海域高通量流体运移的地貌-地质-地球物理标志及其对水合物成藏的控制[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(8): 1033–1044.
- 廖晶, 龚建明, 何拥军, 等. 马克兰增生楔地层层序及发育过程[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 69–72.
- 刘杰, 孙美静, 苏明, 等. 海底泥火山特征及其与天然气水合物的成矿关系[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(8): 53–61.
- 沙志彬, 王宏斌, 张光学, 等. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 283–288.
- 王后金, 沙志斌, 梁劲. 南海神狐暗沙海区天然气水合物地震识别特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 83–87.
- 张光学, 祝有海, 梁金强, 等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 605–612.
- 张伟, 梁金强, 苏丕波, 等. 双似海底反射层与天然气水合物成藏关系研究进展与展望[J]. 中国地质, 2020, 47(1): 29–42.
- 张旭东, 尹成, 曾凡祥, 等. 南海北部陆坡聚集流体活动系统及其对天然气水合物成藏的指示意义[J]. 地质通报, 2021, 40(2/3): 280–286.