

鞠东, 高红芳, 李学杰. 马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物成藏机制及其潜在地质灾害风险[J]. 海洋学报, 2024, 46(3): 22–32, doi:10.12284/hyxb2024004

Ju Dong, Gao Hongfang, Li Xuejie. Mechanism of gas hydrate accumulation and its potential geological hazard risk in the northern accretionary wedge of Manila Trench[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(3): 22–32, doi:10.12284/hyxb2024004

马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物成藏机制及其潜在地质灾害风险

鞠东^{1,2}, 高红芳^{1,2*}, 李学杰^{1,2}

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 511458; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 天然气水合物由于其巨大的资源潜力而受到广泛关注, 但以往研究多集中在南海北部海域被动陆缘, 对南海东部主动陆缘的天然气水合物关注相对较少。本文基于南海东北部马尼拉海沟主动陆缘区多道地震剖面分析, 识别出似海底反射、振幅空白带、极性反转等典型天然气水合物识别标志以及逆断层、泥底辟等流体运移通道。台湾西南部造山带是马尼拉海沟增生楔的延伸, 其泥火山伴生气以 CH₄ 为主, 少部分表现出高氮异常; 其地球化学特征表明, 该区天然气主要为热成因的成熟烃类气, 且主要是新近纪巨厚海相沉积烃源岩的贡献。分析认为, 其成因是板块俯冲运动将深部烃类物质带入增生楔内, 并形成高压环境, 热成因烃类气体沿着泥底辟和逆断层等通道向上运移, 在运移过程中部分天然气被微生物逐步改造, 并混合原位生物气。热成因和生物成因甲烷最终在合适的稳定带内混合; 形成以热成因为主, 部分具有生物成因特征的逆冲推覆控藏混合气源天然气水合物藏。另外, 随着外界环境的变化及俯冲运动的持续活动, 天然气水合物的稳定条件遭到破坏而发生分解渗漏, 可能引起滑坡, 在对本区天然气水合物资源进一步的勘探开发过程中必须注意其潜在地质灾害风险。

关键词: 天然气水合物; 成藏机制; 马尼拉海沟增生楔; 主动陆缘; 南海

中图分类号: P744.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)03-0022-11

1 引言

天然气水合物是一种在海域及陆地高压低温自然地质环境下形成的天然气和水的“似冰”状结晶物质, 是一种主要分布于陆坡及大洋和极地等冻土带的、可以提供巨量天然气资源的重要环保型能源, 其资源潜力巨大, 粗略估算其资源量约是全球石油、天然气和煤等化石能源资源量总和的两倍^[1]。同时, 天然气水合物分解所释放的甲烷是强温室气体^[2]。随着

人类日益增长的能源需求和全球气候变暖对天然气水合物稳定条件的破坏, 天然气水合物研究获得的关注与日俱增。

我国天然气水合物研究起步于 20 世纪 80 年代中后期^[3-4], 随着 2017 年、2020 年两次天然气水合物试采成功, 我国天然气水合物研究热度进一步提升。虽然国内外许多学者对南海天然气水合物进行了大量深入的研究工作, 但已有研究多集中在南海北部海域被动陆缘^[5-11]。对南海东部主动陆缘的天然气水合

收稿日期: 2023-05-19; 修订日期: 2023-08-31。

基金项目: NSFC-广东省联合基金重点项目(U1901214); 海南省自然科学基金青年基金项目(420QN376); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221712, DD20221696)。

作者简介: 鞠东(1986—), 男, 黑龙江省双鸭山市人, 工程师, 主要从事海洋区域地质和海域沉积矿产研究。E-mail: clickjd@163.com

* 通信作者: 高红芳(1971—), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋区域地质和沉积盆地分析研究。E-mail: promap@163.com

物成藏特征关注相对较少^[12-14]。

马尼拉海沟增生楔是典型的主动陆缘。本文以马尼拉海沟增生楔北部海域多道地震资料为基础, 识别出天然气水合物相关的地震反射特征。结合邻区研究成果, 建立了该区域天然气水合物的成藏模式, 并探讨其潜在地质灾害影响, 为该地区天然气水合物的进一步勘探开发提供参考。裴荣富院士是著名的矿床学家和矿产勘查学家, 长期致力于大型超大型矿床、区域成矿和矿业工程研究。谨以此文, 热烈庆贺裴荣富院士百岁华诞。

2 地质背景

马尼拉海沟增生楔位于南海的东部边缘, 与台湾岛西南部相接, 地处亚欧板块和菲律宾海板块的交汇处。南海海盆沿马尼拉海沟向东俯冲于菲律宾岛弧之下, 并形成了海沟-增生楔-弧前盆地-火山弧的马尼拉构造带组合, 在其北部, 与台湾造山带相连(图1)。特殊的地质环境和构造特征使马尼拉构造带成为国内外地质学界关注的焦点^[15-18]。

根据全球板块运动的研究成果, 菲律宾海板块正以 90 mm/a(文献[19])或 80~83 mm/a(文献[20-21])相对于欧亚板块向西北运动^[22-23]。由于北菲律宾岛弧的原始走向与中国大陆边缘走向存在约 50°的夹角及马尼拉俯冲-碰撞带的斜向形态, 碰撞点从北往南迁

移^[24]。台湾山脉由北向南, 逐步由成熟碰撞过渡为初始碰撞, 位于其南部的马尼拉俯冲带仍处于洋壳俯冲状态。南海海盆在晚渐新世-早中新世扩张成盆以后^[25-26], 在菲律宾海板块 NW 向运动的影响下, 南海海盆沿马尼拉海沟东向俯冲, 形成南北走向的增生楔, 在增生楔位置发育大量叠瓦状逆冲推覆构造^[27]。该叠瓦状逆冲推覆构造在南海东北部延伸入陆坡和陆架, 与台湾岛西南部新养女湖逆冲构造和中伦逆冲构造相连接, 可以认为, 马尼拉海沟增生楔与新养女湖逆冲构造、中伦逆冲构造, 属同一应力作用的产物。部分已有研究基于马尼拉俯冲带的沉积和构造背景分析以及近海域发现存在大量冷泉碳酸盐岩, 推测马尼拉海沟增生楔的中浅层为潜在的天然气水合物层^[28-29]。

3 数据资料

本文选用的多道地震数据总计约 102 km, 采集于 2013-2014 年, 测线位置见图 1。采用 480 道 Sentinel 数字电缆, 道间距为 12.5 m, 作业炮间距为 37.5 m, 采样率为 2 ms, 电缆深度为 10 m, 最小偏移距离为 225 m。震源总容量为 5 080 in³ BOLT 枪阵, 资料记录长度为 14 s。地震数据经过振幅恢复、压制噪声、压制多次波、反褶积和子波处理、速度分析、叠前时间偏移、叠后去噪等处理步骤, 得到了清晰的多道地震反射剖面, 可以准确反映增生楔区域地层地震相特征。

4 天然气水合物的地震剖面特征

受水合物稳定所需条件控制, 海洋环境中水合物主要分布于水深范围为 400~3 000 m 的海底浅部沉积物中^[4, 8, 10, 30-31], 埋藏深度不等。水合物稳定带下部, 甲烷以游离气的形式和水共存, 称为游离气区(Free Gas Zone, FGZ)。水合物稳定带与游离气区之间存在 1 个明显界面, 其形态主要受所处的温、压条件控制, 其上为固态的天然气水合物, 其下为游离气和水, 物性差异巨大, 在地震资料上通常表现为高振幅特征, 多平行于海底, 斜穿地层同相轴, 通常称为似海底反射层(Bottom Simulating Reflector, BSR)。BSR 的存在被普遍认同为天然气水合物存在的依据之一^[32-37]。

在 BSR 上部, 由于天然气水合物对沉积物空隙的填充和胶结, 在地震资料上可见振幅空白带反射异常带(Blanking Zone, BZ)。BSR 下部, 游离气受天然气水合物的封堵作用, 聚集在水合物底部, 形成杂乱异常反射区, 可以作为 FGZ 存在的依据。

在俯冲作用的影响下, 大量沉积物进入马尼拉俯

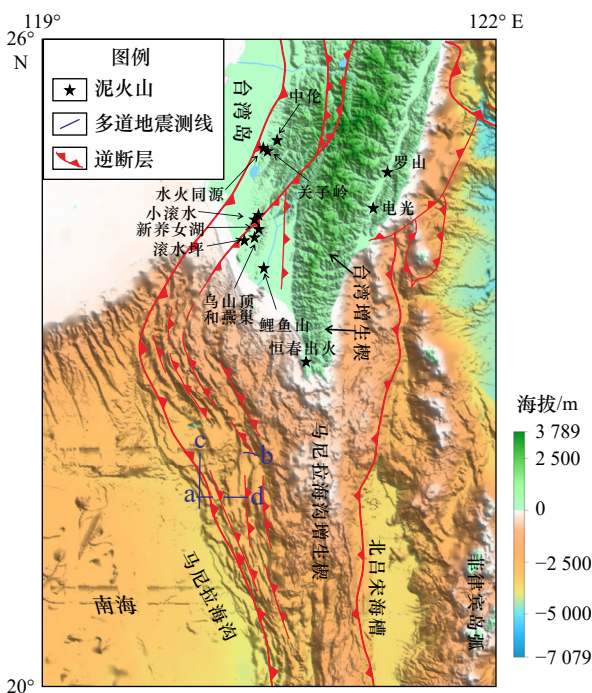


图1 马尼拉海沟增生楔及多道地震测线位置
Fig. 1 Manila Trench accretionary wedge and location of multichannel seismic line

冲带。陆源和海洋有机质被埋藏、转移、热解生成烃^[13]，为天然气水合物的形成提供了烃类基础。二维多道地震资料显示，在马尼拉海沟增生楔北部海域存在典

型 BSR 分布，BSR 及附近地层的地震反射成像清晰、特征明显、连续性好，有利于对本区天然气水合物渗漏成藏系统开展深入研究(图 2)。

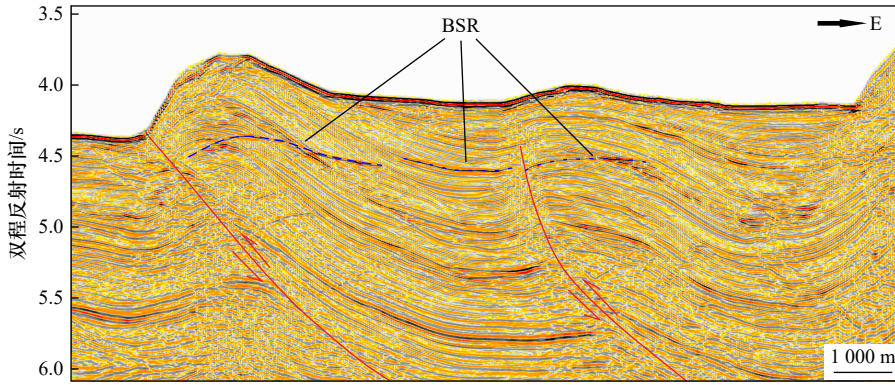


图 2 测线 a 的似海底反射(BSR)特征

Fig. 2 Bottom simulating reflector (BSR) characteristics in survey Line a

本区似海底反射层(BSR)主要发育在海底以下 300~500 m 的地层中，具有分布连续、与海底大致平行、斜穿地层同相轴、强振幅且与海底极性相反等特点。在地震剖面上，海底表现为黑色-红色-黑色的复合反射层。黑色为负相位，红色为正相位。BSR 反射相位与海

底反射相位相反(图 3)。在 BSR 上部，可见振幅空白带异常反射特征，其双程反射时间一般不超过 0.2 s，对应厚度大约为 170 m(图 3, 图 4)。空白带的存在，是由于天然水合物填充胶结赋存地层沉积物孔隙，增强地层均质性，使得地层波阻抗差减小，从而减弱地震反射振

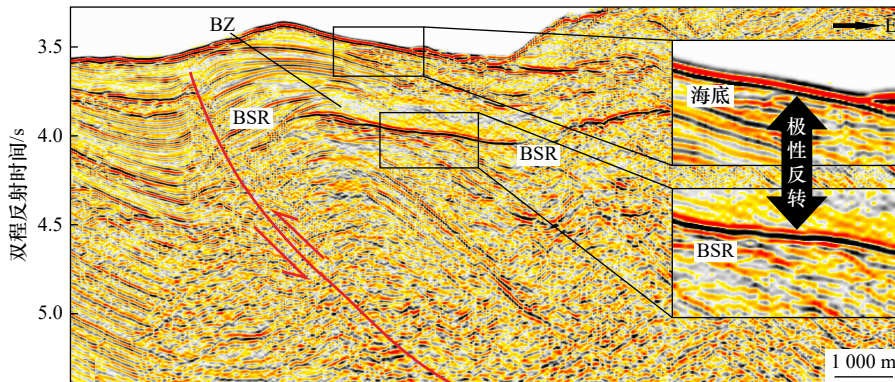


图 3 测线 b 的逆冲断层与 BSR 极性反转

Fig. 3 Thrust fault and polarity reversal of BSR in survey Line b

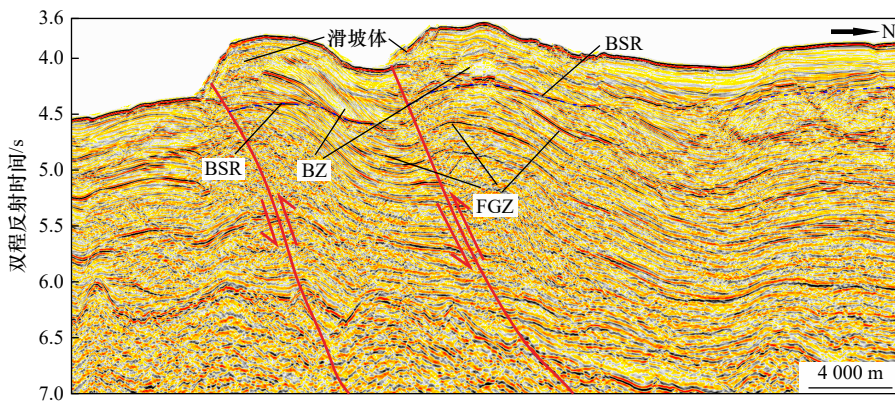


图 4 测线 c 的 BSR、逆冲断层及滑坡体

Fig. 4 BSR, thrust fault, and landslide in survey Line c

幅,在地震剖面上呈现振幅空白带异常。在BSR下部,被封堵的游离气形成FGZ,在地震剖面上表现为

异常反射区(图4,图5)。许威等^[38]计算北吕宋海槽南段的天然气水合物稳定带厚度最大可达1100m。

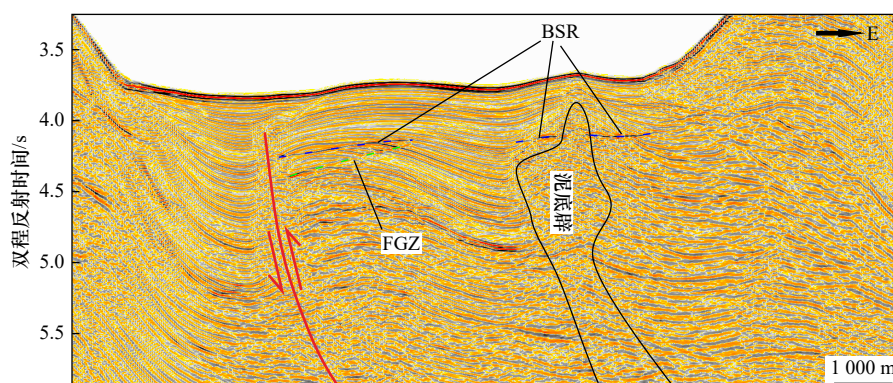


图5 测线d的泥底辟反射特征

Fig. 5 Characteristics of mud diapiric reflection in survey Line d

研究区位于马尼拉俯冲带增生楔区域,广泛发育逆断层。临近BSR的逆断层常表现为沿断层分布一定宽度的杂乱反射(图2,图3和图5)。可以解释为沿断裂运移的流体对周边沉积物孔隙的充填胶结作用,从而使地层均质性增强,减少了波阻抗差,进而导致地震剖面上呈现杂乱反射(图2,图5)。本区广泛分布的逆冲断裂,在甲烷向上运移的过程中发挥重要作用。马尼拉俯冲带挤压作用强烈,强烈的挤压应力为烃类气体向上运移提供了充足动力。俯冲带内形成一系列叠瓦状逆断层,为烃类气体提供向上运移的通道。当断层切过深部油气藏时,在深部地层高压的作用下,烃类流体析出并沿断层向上运移,在温压条件合适的浅部地层富集,与孔隙水化合形成天然气水合物。

在区域挤压作用下,本区大量发育泥底辟,其地震反射表现为同相轴错断、变形,内部表现为杂乱反射。地震剖面显示,在泥底辟发育带,BSR主要分布于泥底辟两侧,斜交于等时地层,埋藏深度相对较小(图5)。在区域俯冲带的挤压作用下,泥底辟刺穿上部地层,为烃类流体的向上运移提供通道。断裂和泥底辟连通天然气水合物与深部烃源岩,为天然气水合物的形成提供了运移通道。因此,增生楔内广泛发育的逆断层和泥底辟等构造有利于烃类气体的运移和富集,是天然气水合物成藏的有力环境^[39-40]。

5 关于天然气水合物烃类来源的探讨

台湾增生楔是马尼拉海沟增生楔在陆上的延伸(图1),在台湾南部发育典型的增生柱状体^[41],沿着构造缝合带发育许多泥火山(图6)。与本区天然气水合物属同一俯冲增生带,其气体来源可以作为天然气

水合物甲烷物质来源的参考^[43]。这些泥火山渗漏气体多数以甲烷占绝对优势,乙烷等其他烃类气体的含量较低,少部分样品以CO₂为主^[42]。



a. 乌山顶泥火山

b. 新养女湖泥火山

图6 中国台湾一些泥火山口照片^[43](位置见图1)

Fig. 6 Some photos of mud craters in Taiwan Province, China^[43] (Fig. 1 for location)

Yang等^[42]对台湾地区具有代表性的泥火山(图1)和渗漏的气体组成进行了测试(表1)。其结果显示,泥火山渗漏的大部分气体都以CH₄为主(≥92%)。而中伦和关子岭泥火山,表现出CO₂为主的气体成分特征。如表1所示,这些气体明显至少有两种源组分:一种是中伦泥火山气体的CO₂主要来源;另一种是水火同源泥火山气体的CH₄主要来源。在此基础上,可将关子岭泥火山气体视为这两种成分不同比例的混合物。

现有的氦同位素资料有助于解释地球化学特征。台湾西南部CH₄为主的泥火山喷出气体通常表现出较高的氦同位素比。多处喷出气体的氦同位素比值³He/⁴He为0.82~1.34 Ra(Ra为空气比),⁴⁰Ar/³⁶Ar值为305.5~330.0^[44]。通过对渗漏气体的地球化学特征分析可以判断,台湾西南部泥火山渗漏气体主要来自热解成因的成熟烃类气,其形成年代较新。结合区域沉积特征分析,本区渗漏甲烷的烃类物质主要来自新近纪巨厚海相沉积烃源岩的析出,含有少量深部幔源成分^[44]。

表1 台湾西南部泥火山渗漏气体样品的地球化学特征(据文献[42]修改)

Table 1 Geochemical characteristics of gas samples from mud volcanoes in southwest Taiwan (modified according to reference [42])

取样地	天然气组分									
	CH ₄ 含量/%	N ₂ 含量/%	O ₂ 含量/%	Ar含量/%	CO ₂ 含量/%	C ₂ H ₆ 含量/%	CH ₄ *含量/%	N ₂ *含量/%	Ar*含量/%	CO ₂ *含量/%
中伦	10.75	4.57	0.2	0.02	83.92	0.55	10.86	3.88	0.01	84.7
关子岭	4.26	4.18	0.99	0.05	90.53	—	4.47	0.55	0.01	94.98
水火同源	92.06	5.55	0.59	0.05	1.76	—	94.71	3.46	0.03	1.81
小滚水	93.99	4.2	0.84	0.05	0.89	0.1	97.91	1.13	0.02	0.93
新养女湖	92.47	3.06	0.67	0.04	1.35	2.4	95.51	0.58	0.02	1.39
乌山顶	97.13	1.88	0.43	0.02	0.49	0.23	99.16	0.28	0.01	0.49
燕巢	95.41	2.92	0.65	0.04	0.99	—	98.44	0.53	0.01	1.02
滚水坪	92.6	2.61	0.6	0.03	3.78	0.38	95.33	0.39	0.01	3.89
恒春出火	83.36	9.83	2.27	0.14	0.33	4.09	93.47	1.55	0.04	0.36
罗山	88.94	9.57	0.92	0.08	0.04	0.47	93.02	6.42	0.04	0.04

注: *为空气校正成分,假设所有的O₂都来自空气污染,气体成分可以相应校正并重新归一化至100%;“—”表示无数据^[50]。

中伦和罗山等样品在空气校正后也表现出异常的氮过量组成(表1),过量的氮可能是受生物成因/热成因的作用^[42]。部分喷出气甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$)为 -33.68% ~ -60.22% ^[45],一般认为, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < -55\%$ 为生物成因气, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} > -55\%$ 为热成因气^[46-48]。台湾西南部泥火山渗漏气体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 区间恰好位于 -55% 附近,兼具生物成因气和热成因气特征,可以判定为混合成因气。邻近海域浅表层岩芯地球化学分析显示,TOC含量为 0.4% ~ 1.3% , $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 为 -26.7% ~ -23.9% ,能够满足微生物产甲烷的需要^[49]。

何家雄等^[44]基于台湾南部泥火山渗漏气体的地球化学分析认为,渗出甲烷的烃类气体主要来自中新统及上新统泥页岩。台湾南部陆上区域和台西南盆地南部深水区,在中新世及上新世沉积了规模巨大的海相页岩,为泥火山的形成提供了物质基础。台西南盆地钻探结果显示,台西南盆地主要烃源岩为渐新统—下中新统有机质较丰富的海相泥页岩^[51],有机碳含量多为 0.56% ~ 1.82% ,镜质体反射率(R_0 值)为 0.57% ~ 1.02% ,属成熟—高成熟烃源岩,生源母质类型为腐殖型母质(III)^[52],表明该区烃源岩多处存在生烃成气窗口范围,能够提供充足的烃气源。在南海向东俯冲作用下,大量成熟烃源岩被带入增生楔之下,为热解气提供了物质基础。

6 天然气水合物成藏模式

构造因素是本区天然气水合物成藏过程中的重

要因素。马尼拉俯冲带处于南海东部边缘,属主动碰撞边缘。其构造主要受火山弧外侧新增生楔的碰撞作用控制,逆冲断层和与增生楔相关的褶皱带非常发育。由于板块的俯冲作用,临近盆地内早期沉积的烃源岩被带入增生楔之下;同时,由于挤压作用强烈,俯冲带内形成一系列叠瓦状逆断层和泥底辟/泥火山,使得增生楔内部的压力得到释放,为烃类气体提供向上运移通道的同时,也为其运移提供了动力。当断层切过深部油气藏时,深部地层的高压得到释放,烃类流体析出并沿断层向上运移,在运移的过程中逐步完成相态分异,其中甲烷气最易发生运移,其运移距离最远,速度最快。浅部的褶皱构造可以给向上运移聚集的气体提供封盖,有助于甲烷气体的大量富集,在合适的温压条件下形成天然气水合物。研究区晚中新世以来沉积的大套富含有机质的海相泥质粉砂岩和细砂岩,在提供充足的微生物生产甲烷的同时,也提供了天然气水合物成藏所需空间,热成因甲烷与生物成因甲烷在此混合,形成混合气源水合物藏。

另外,俯冲区发育有大量泥底辟构造。在区域俯冲强烈挤压应力的作用下,深部物质被向上挤入,刺穿浅部沉积物,形成泥底辟构造。泥底辟构造导致浅部沉积物被刺穿或上隆,周边地层受牵引发生变形。泥底辟伴随着地层刺穿和深部物质的向上迁移,为深部烃类气体向上运移提供了良好的通道。泥底辟构造的形成过程中,会造成上覆地层和周围地层的变形和破裂,从而破坏地层的封堵作用,促进深部流体释

放,对天然气水合物的成藏十分有利。尽管部分泥底辟构造与逆断层活动强烈,达到海底附近(图2,图4),可能会破坏天然气水合物藏并使其发生渗漏,但存留的天然气水合物藏依然具有一定规模并形成清晰的BSR(图4,图5)。同时,中新统孔隙型海相砂岩是台西南盆地的主力油气储层^[51],孔隙度一般为5%~19%,渗透率为 $0.2 \times 10^{-3} \sim 100.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有良好的孔隙度和渗透性。这些都为天然气水合物的聚集成藏提供了较为完善的输送条件。

综合以上分析,马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物成藏模式总结为(图7):区域俯冲运动将古近系/中生界烃源岩带入增生楔内,在深部地层的挤

压作用下形成高压环境;新近纪海相烃源岩生成甲烷等气体下,在区域挤压应力的作用下,沿着泥底辟和逆断层等构造通道向上运移;最终在浅部褶皱和逆断层形成的封堵构造中发生聚集,在稳定带内形成天然气水合物藏。结合台西南泥火山渗出气体的地球化学特征判断,本区天然气水合物与南海北部和台西南盆地西部的一些相关研究^[46, 53-55]有一定相似性,表现为以热成因气为主,具有一部分生物气的特征。推测是由于热解气在向上运移的过程中受到浅部微生物的改造作用,并混入部分原位生物气。综上所述,马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物为逆冲推覆控藏的混合气源天然气水合物成藏模式。

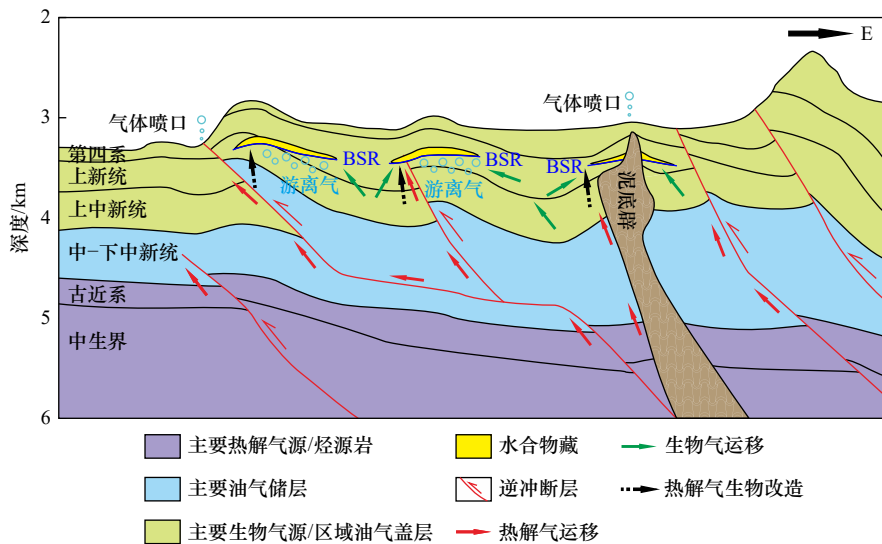


图7 马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物成藏地质模式

Fig. 7 Geological model of gas hydrate accumulation in the northern accretionary wedge of Manila Trench

7 天然气水合物分解渗漏的潜在地质风险

天然气水合物的稳定是一个动态平衡状态,其稳定性高度依赖于所处的环境条件。外界环境的改变,如压力下降和温度升高等变化都能导致天然气水合物失稳分解,进而导致甲烷释放。自然界的冰期旋回变化、全球温室效应、海平面下降、海水温度上升、海底沉积物的剥蚀或滑坡、海底地震等因素都可能引起天然气水合物分解^[56-57],并产生相关的环境影响和地质灾害。本区部分断裂和泥底辟活动达到海底附近,为天然气水合物的分解渗漏提供了通道。附近海域及邻区台湾南部广泛发育泥火山和浅断层^[58],可以预见本区甲烷渗漏的风险较大。渗漏的甲烷会降低海底沉积物的结构强度,进而引发海底滑坡(图8)。

研究区俯冲活动仍在不断进行^[60-61],断层和底辟

构造能量较强,部分甚至穿过天然气水合物层,达到海底附近(图2,图4),可能破坏水合物藏,导致流体释放,发生滑坡。地震剖面上可见位于海底的滑坡体,其下有逆断层与天然气水合物层连通(图4)。研究区附近的南海北部陆坡和东沙海域地震剖面上均发现了与天然气水合物相关的大型滑坡体^[60-61],研究区与东沙海域滑坡的地震反射剖面具有一定的相似性(图4,图9)。即滑坡带处于海底附近,存在较强的断裂活动,沿断裂可见弱反射,断裂之下存在明显的BSR,指示天然气水合物的存在。

当天然气水合物所处的稳定条件被破坏时,水合物会分解释放甲烷,甲烷溶解于孔隙水并形成酸性物质,腐蚀沉积物并降低其力学强度。同时,释放的甲烷会在沉积物内形成大量的气孔和渗漏通道,破坏沉积物结构并增大沉积物的空隙压力,进一步降低沉积物的强度。连续分布的天然气水合物分解将形成一

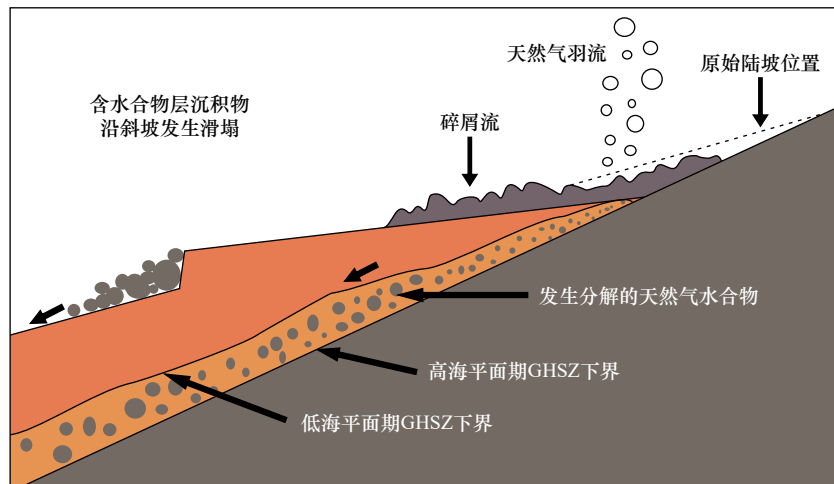


图 8 天然气水合物发生分解导致海底滑塌^[59]

Fig. 8 The breakdown of gas hydrates caused the sea floor to collapse

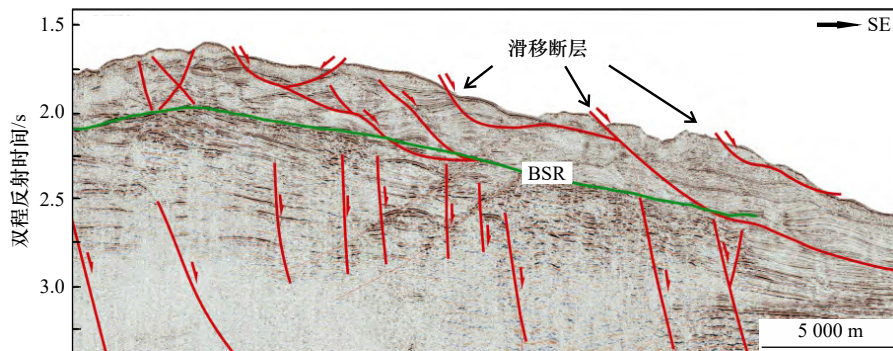


图 9 东沙海域地震测线上的天然气水合物滑坡与 BSR(红色为断裂, 绿色为 BSR)^[60]

Fig. 9 Natural gas hydrate landslides and BSR on the seismic survey line in the Dongsha area (red represents is faults, green represents is BSR)

个滑动面, 在地震或者沉积、剥蚀等诱因的作用下, 引起海底滑坡。海底滑坡可能破坏钻井平台或其他海洋工程设施, 其地质灾害风险尤其值得注意。上覆沉积物因滑坡而缺失后, 水合物所处的环境压力降低, 封堵条件被破坏, 加剧水合物的分解, 进而引发连锁效应, 可能直至引发海啸等更大规模的灾害。

8 结论

(1) 在马尼拉海沟增生楔北部的二维多道地震剖面上识别出了清晰、连续的似海底反射, 位于海底以下 300~500 m, 且大致与海底平行, 明显斜穿地层, 与海底反射存在极性反转。属于天然气水合物存在的典型地震反射特征。

参考文献:

[1] 王淑玲, 孙张涛. 全球天然气水合物勘查试采研究现状及发展趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(7): 24-32.

Wang Shuling, Sun Zhangtao. Current status and future trends of exploration and pilot production of gas hydrate in the world[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(7): 24-32.

(2) 研究区天然气水合物成藏模式为: 区域俯冲运动将深部烃类物质带入增生楔内, 并形成高压环境; 热成因烃类气体沿着泥底辟和逆断层等构造向上运移; 在运移过程中部分发生微生物改造, 并与浅部的生物成因天然气发生混合; 最终在浅部稳定带内发生聚集形成以热成因气特征为主, 部分具有生物成因特征的天然气水合物藏。即马尼拉海沟增生楔北部海域天然气水合物为逆冲推覆控藏的混合气源天然气水合物藏。

(3) 环境的变化可能导致天然气水合物的失稳并分解渗漏进而引起海底滑塌。研究区部分断层和泥底辟穿过天然气水合物层并达到海底, 为天然气水合物的渗漏提供了通道, 其地质灾害风险尤其值得注意。

- [2] 聂云峰, 于晶, 陈宏文, 等. 北极斯瓦尔巴特群岛及邻区天然气水合物分解对气候、海洋环境和生物的影响[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 1012-1024.
Nie Yunfeng, Yu Jing, Chen Hongwen, et al. Climatic, environmental and biological impacts of gas hydrate decomposition in Arctic Svalbard and its surrounding areas[J]. Geoscience, 2018, 32(5): 1012-1024.
- [3] 潘一, 杨双春. 天然气水合物研究进展[J]. 当代化工, 2012, 41(4): 401-404.
Pan Yi, Yang Shuangchun. Research progress in natural gas hydrates[J]. Contemporary Chemical Industry, 2012, 41(4): 401-404.
- [4] 赵伟, 王全胜, 郑星升. 国内天然气水合物研究进展[J]. 石化技术, 2019, 26(10): 165-167.
Zhao Wei, Wang Quansheng, Zheng Xingsheng. Research progress on natural gas hydrate in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(10): 165-167.
- [5] Liu Changling, Meng Qingguo, He Xingliang, et al. Characterization of natural gas hydrate recovered from Pearl River Mouth Basin in South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 14-21.
- [6] Yu Xinghe, Wang Jianzhong, Liang Jinqiang, et al. Depositional characteristics and accumulation model of gas hydrates in northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 56: 74-86.
- [7] 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.
- [8] 匡增桂, 郭依群. 南海北部神狐海域新近系以来沉积相及水合物成藏模式[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(5): 914-920.
Kuang Zenggui, Guo Yiqun. The sedimentary facies and gas hydrate accumulation models since Neogene of Shenhu Sea Area, northern South China Sea[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(5): 914-920.
- [9] 张光学, 陈芳, 沙志彬, 等. 南海东北部天然气水合物成藏演化地质过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 15-23.
Zhang Guangxue, Chen Fang, Sha Zhibin, et al. The geological evolution process of natural gas hydrate reservoirs in the northeastern South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 15-23.
- [10] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 中国南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物成藏特征及机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 670-680.
Zhang Wei, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, et al. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 670-680.
- [11] 沙志彬, 梁金强, 苏丕波, 等. 珠江口盆地东部海域天然气水合物钻探结果及其成藏要素研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 125-135.
Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Su Pibo, et al. Natural gas hydrate accumulation elements and drilling results analysis in the eastern part of the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(6): 125-135.
- [12] 邓辉. 台湾西南海域地震数据处理及天然气水合物识别[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006.
Deng Hui. Seismic data processing and identifying for gas hydrate offshore Southwest Taiwan[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [13] 丁巍伟, 陈汉林, 王渝民, 等. 台湾增生楔天然气水合物的地震特征[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(1): 90-96.
Ding Weiwei, Chen Hanlin, Wang Yumin, et al. Geophysical features of gas hydrate in Taiwan Accretionary prism, South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(1): 90-96.
- [14] 尚继宏, 李家彪. 南海东北部陆坡与恒春海脊天然气水合物分布的地震反射特征对比[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4): 12-20.
Shang Jihong, Li Jiabiao. A study on the seismic reflection of the gas hydrate distribution at the northeast SCS slope and Hengchun Ridge[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24(4): 12-20.
- [15] 李家彪, 金翔龙, 阮爱国, 等. 马尼拉海沟增生楔中段的挤入构造[J]. 科学通报, 2004, 49(10): 1000-1008.
Li Jiabiao, Jin Xianglong, Ruan Aiguo, et al. Indentation tectonics in the accretionary wedge of middle Manila Trench[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(10): 1000-1008.
- [16] 高金尉, 吴时国, 姚永坚, 等. 马尼拉俯冲带北段增生楔前缘构造变形和精细结构[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2845-2858.
Gao Jinwei, Wu Shiguo, Yao Yongjian, et al. Tectonic deformation and fine structure of the frontal accretionary wedge, northern Manila subduction zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 2845-2858.
- [17] 王红丽, 赵强, 黄金莲, 等. 马尼拉俯冲带北段增生楔形态结构及演化过程[J]. 海洋科学, 2019, 43(8): 1-16.
Wang Hongli, Zhao Qiang, Huang Jinlian, et al. Morphological structure and evolution of accretionary wedge in the northern part of Manila subduction zone[J]. Marine Sciences, 2019, 43(8): 1-16.
- [18] 王哲, 李学杰, 高红芳, 等. 马尼拉俯冲带北段前渊构造层特征及构造含义[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(2): 278-283.
Wang Zhe, Li Xuejie, Gao Hongfang, et al. Characteristics and tectonic implications of structural layers in foredeep of the northern segment of Manila subduction zone[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 40(2): 278-283.
- [19] Sella G F, Dixon T H, Mao Ailin. REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B4): 2081.
- [20] Lallemand S, Liu C S. Geodynamic implications of present-day kinematics in the southern Ryukyus[J]. Journal of the Geological Society of China, 1998, 41(4): 551-564.
- [21] Yu S B, Chen H Y, Kuo Longchen. Velocity field of GPS stations in the Taiwan Area[J]. Tectonophysics, 1997, 274(1/3): 41-59.

- [22] Seno T, Stein S, Gripp A E. A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B10): 17941–17948.
- [23] Seno T. The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea Plate relative to the Eurasian Plate[J]. *Tectonophysics*, 1977, 42(2/4): 209–226.
- [24] Suppe J. The active Taiwan Mountain Belt[M]//Schaer J P, Rodgers J. *The Anatomy of Mountain Ranges*. Princeton: Princeton University Press, 1987.
- [25] Hayes D E, Lewis S D. A geophysical study of the Manila Trench, Luzon, Philippines: 1. Crustal structure, gravity, and regional tectonic evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B11): 9171–9195.
- [26] 丁巍伟, 陈汉林, 杨树锋, 等. 南海西南次海盆与东部次海盆地质与地球物理分析 [J]. *高校地质学报*, 2002, 8(3): 268–279.
Ding Weiwei, Chen Hanlin, Yang Shufeng, et al. Geological and geophysical analysis of the southwestern and eastern sub-basins, South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(3): 268–279.
- [27] Hall R, Wilson M E J. Neogene sutures in eastern Indonesia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(6): 781–808.
- [28] Lin Chechuan, Lin A T S, Liu C , et al. Geological controls on BSR occurrences in the incipient arc-continent collision zone off Southwest Taiwan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1118–1131.
- [29] 罗敏, 王宏斌, 杨胜雄, 等. 南海天然气水合物研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(1): 56–69.
Luo Min, Wang Hongbin, Yang Shengxiong, et al. Research advancement of natural gas hydrate in South China Sea[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(1): 56–69.
- [30] 董马超. 海底天然气水合物及与其有关的地震反射 [J]. *石油化工应用*, 2015, 34(12): 70–73.
Dong Machao. Marine natural gas hydrate and concerned seismic reflection[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2015, 34(12): 70–73.
- [31] 焦春波. 珠江口盆地东部天然气水合物地震识别依据 [J]. *辽宁化工*, 2016, 45(11): 1391–1393.
Jiao Chunbo. Identification of gas hydrate based on geological and seismic methods in the eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, 45(11): 1391–1393.
- [32] 李丽, 杨志力, 吴敬武, 等. 西沙海域似海底反射地震特征及分布控制因素 [C]//2019 油气田勘探与开发国际会议论文集. 西安: [出版地不详], 2019: 493–494.
Li Li, Yang Zhili, Wu Jingwu, et al. Characteristics and distribution control factors of submarine reflection seismic in Xisha Sea Area[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Oil and Gas Exploration and Development. Xi'an: [s.n.], 2019: 493–494.
- [33] 王霄飞. 南海北部陆坡东西段新构造的异同及对 BSR 分布的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang Xiaofei. Similarities and differences of neotectonics of the northern South China Sea slope and its effect on the distribution of BSR[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [34] 幸福兵. 南海西北部陆坡 BSR 特征 [J]. *辽宁化工*, 2018, 47(10): 1071–1073.
Xin Fubing. BSR characteristics of the slope area in the northwestern of the South China Sea[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2018, 47(10): 1071–1073.
- [35] 张建国, 刘怀山, 岳家彤. 不同震源对天然气水合物的响应特征分析 [C]//第十三届国家安全(军事)地球物理学术研讨会论文集. 西安: [出版地不详], 2017: 273–277.
Zhang Jianguo, Liu Huaishan, Yue Jiatong. Analysis of response characteristics of different seismic sources to natural gas hydrate[C]//Proceedings of the 13th National Security (Military) Geophysical Symposium. Xi'an: [s.n.], 2017: 273–277.
- [36] Zhang Ruwei, Li Hongqi, Zhang Baojin, et al. Detection of gas hydrate sediments using prestack seismic AVA inversion[J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(3): 453–464, 470.
- [37] 张旭东. 琼东南海域天然气水合物地震反射特征 [J]. *物探与化探*, 2014, 38(6): 1152–1158.
Zhang Xudong. The seismic reflection characteristics of gas hydrate in Southeast Hainan Sea Area of the South China Sea[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(6): 1152–1158.
- [38] 许威, 邱楠生, 孙长宇, 等. 南海天然气水合物稳定带厚度分布特征 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 467–473.
Xu Wei, Qiu Nansheng, Sun Changyu, et al. The distribution characteristics of the thickness of gas hydrate stability zone in South China Sea[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 467–473.
- [39] 陈志豪, 吴能友, 李家彪. 马尼拉海沟俯冲带增生楔中天然气水合物的流体运移通道 [J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 441–449.
Chen Zhihao, Wu Nengyou, Li Jiabiao. Pathway of fluid migration for gas hydrate in the accretionary wedge of manila subduction zone, northeastern South China Sea[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 441–449.
- [40] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 活动大陆边缘水合物分布规律及成藏过程 [J]. *海洋地质动态*, 2001, 17(7): 3–7.
Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, et al. Distribution pattern and reservoir formation process of active continental margin hydrates[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2001, 17(7): 3–7.
- [41] Huang Chiyue, Wu Weiyu, Chang C P, et al. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 1997, 281(1/2): 31–51.
- [42] Yang T F, Yeh G H, Fu C C, et al. Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan[J]. *Environmental Geology*, 2004, 46(8): 1003–1011.
- [43] 戴金星, 吴小奇, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(2): 178–190.

- Dai Jinxing, Wu Xiaohui, Ni Yunyan, et al. Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(3): 355–367.
- [44] 何家雄, 崔洁, 翁荣南, 等. 台湾南部泥火山与伴生气地质地球化学特征及其油气地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 319–326.
- He Jiexiong, Cui Jie, Weng Rongnan, et al. Geology of mud volcanoes and geochemistry of associated gas in southern Taiwan and its significance to petroleum geology[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 319–326.
- [45] Chao H C, You Chenfeng, Sun C H. Gases in Taiwan mud volcanoes: chemical composition, methane carbon isotopes, and gas fluxes[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(3): 428–436.
- [46] 孙涛, 李清平, 丁蓉, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物气源混合类型及定量表征 [J]. *新能源进展*, 2021, 9(3): 226–231.
- Sun Tao, Li Qingping, Ding Rong, et al. Gas source mixing types and quantitative characterization of natural gas hydrate in Shenhu Area, northern of South China Sea[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2021, 9(3): 226–231.
- [47] 张小军, 陶明信, 王万春, 等. 生物成因煤层气的生成及其资源意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(2): 166–171.
- Zhang Xiaojun, Tao Mingxin, Wang Wanchun, et al. Generation of biogenic coalbed gases and its significance to resources[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(2): 166–171.
- [48] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 卷一 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. *Natural Gas Geology in China: Volume 1*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [49] 杨玉峰, 雷怀彦. 南海北部台西南盆地 973-4 岩芯碳的地球化学特征 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(8): 100–107.
- Yang Yufeng, Lei Huaiyan. Geochemical characteristics of carbon in core 973-4 from southwestern Taiwan Basin in northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(8): 100–107.
- [50] 蒋雨函, 高小其, 王阳洋, 等. 中国新疆北天山和台湾南部陆地泥火山研究进展 [J]. *地震*, 2020, 40(3): 65–82.
- Jiang Yuhuan, Gao Xiaoqi, Wang Yangyang, et al. A review of researches on land mud volcanoes in northern Tianshan of Xinjiang and southern Taiwan, China[J]. *Earthquake*, 2020, 40(3): 65–82.
- [51] 何家雄, 夏斌, 陈恭洋, 等. 台西南盆地中新生界石油地质与油气勘探前景 [J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(4): 398–402.
- He Jiexiong, Xia Bin, Chen Gongyang, et al. Petroleum geology and exploration prospect of Mesozoic and Cenozoic in Taixinan Basin, northern South China Sea[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(4): 398–402.
- [52] 何家雄, 夏斌, 王志欣, 等. 南海北部大陆架东区台西南盆地石油地质特征与勘探前景分析 [J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(3): 345–350.
- He Jiexiong, Xia Bin, Wang Zhixin, et al. Petroleum geologic characteristics and exploration base of Taixinan Basin in eastern area of continental shelf in northern of the South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(3): 345–350.
- [53] 苏丕波, 何家雄, 梁金强, 等. 南海北部陆坡深水天然气水合物成藏系统及其控制因素 [J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 1–10.
- Su Pibo, He Jiexiong, Liang Jinqiang, et al. Natural gas hydrate migration and accumulation system and its controlling factors on northern deep water slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(7): 1–10.
- [54] 苏丕波, 梁金强, 沙志彬, 等. 神狐深水海域天然气水合物成藏的气源条件 [J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2014, 36(2): 1–8.
- Su Pibo, Liang Jinqiang, Sha Zhibin, et al. Gas sources condition of gas hydrate Formation in Shenhu deep water sea zone[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014, 36(2): 1–8.
- [55] 黄伟, 张伟, 梁金强, 等. 琼东南盆地和郁陵盆地天然气水合物成藏对比研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 363–380.
- Huang Wei, Zhang Wei, Liang Jinqiang, et al. Comparative study of gas hydrate accumulation system in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea and the Ulleung Basin of Korea[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 363–380.
- [56] Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, et al. Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: the Clathrate Gun Hypothesis[M]. Washington: American Geophysical Union, 2003.
- [57] Paull C K, Buelow W J, Ussler III W, et al. Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments[J]. *Geology*, 1996, 24(2): 143–146.
- [58] 何家雄, 万志峰, 张伟, 等. 南海北部泥底辟/泥火山形成演化与油气及水合物成藏 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- He Jiexiong, Wan Zhifeng, Zhang Wei, et al. Formation and Evolution of Mud Diapir/Mud Volcano and Hydrocarbon and Hydrate Accumulation in Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [59] Crutchley G J, Mountjoy J J, Pecher I A, et al. Submarine slope instabilities coincident with shallow gas hydrate systems: insights from New Zealand examples[M]//Lamarche G, Mountjoy J, Bull S, et al. Submarine Mass Movements and their Consequences. Cham: Springer, 2016: 401–409.
- [60] 张丙坤, 李三忠, 夏真, 等. 南海北部海底滑坡与天然气水合物形成与分解的时序性 [J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(2): 434–440.
- Zhang Bingkun, Li Sanzhong, Xia Zhen, et al. Time sequence of submarine landslides and gas hydrates in the northern South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(2): 434–440.
- [61] 周吉林, 王秀娟, 朱振宇, 等. 海底滑坡对天然气水合物和游离气分布及富集的影响 [J]. *地球物理学报*, 2022, 65(9): 3674–3689.
- Zhou Jilin, Wang Xiujuan, Zhu Zhenyu, et al. The influence of submarine landslides on the distribution and enrichment of gas hydrate and free gas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(9): 3674–3689.

Mechanism of gas hydrate accumulation and its potential geological hazard risk in the northern accretionary wedge of Manila Trench

Ju Dong^{1,2}, Gao Hongfang^{1,2}, Li Xuejie^{1,2}

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: Natural gas hydrates have received widespread attention due to their enormous resource potential, but previous researches have focused mostly on the passive continental margin in the northern South China Sea, while rarely on the active continental margin in the eastern South China Sea. Based on the analysis of multi-channel seismic profiles in the active continental margin area of the Manila Trench in northeast of the South China Sea, this paper identified typical gas hydrate indicators such as bottom simulating reflector, blanking zone, polarity-reversal, and fluid migration channels, such as reverse fault and mud diapir are identified in this paper. The Orogenic Belt in southwestern Taiwan is an extension of the accretionary wedge of the Manila Trench. The associated gas of mud volcano is mainly CH₄ and minorly showing high nitrogen anomaly. The geochemical characteristics of the associated gas show that natural gas in this area is mainly mature hydrocarbon gas of pyrolysis origin, and is mainly the contribution of Neogene thick marine sedimentary source rock. According to the analysis, the cause is that the plate subduction brought deep hydrocarbon into the accretionary wedge and formed a high-pressure environment. The thermally generated hydrocarbon gas migrated upward along mud diapir and reverse fault. During the migration, some natural gas was gradually transformed by decomposition of microorganisms and mixed with *in-situ* microbial gas. The thermogenic and biogenic methane eventually mixed in the suitable stable zone to form a mixed gas hydrate reservoir dominated by thermogenic and partly biogenic. In addition, with the change of external environment and the continuous activities of subduction movement, the stability of natural gas hydrate is damaged and decomposition leakage occurs, which may cause landslide. In the further exploration and development of natural gas hydrate resources in this area, we must pay attention to the potential geological disaster risk.

Key words: gas hydrate; accumulation mechanism; accretive wedge of Manila Trench; active continental margin; South China Sea