

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

张旭东^{1,2,3}, 尹成², 曾凡详^{1,3}, 赵斌^{1,3}

ZHANG Xudong^{1,2,3}, YIN Cheng², ZENG Fanxiang^{1,3}, ZHAO Bin^{1,3}

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

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室/西南石油大学, 四川 成都 610500;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458

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

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation/Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China

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

摘要:利用台西南盆地三维高精度地震资料,对南海北部陆坡聚集流体活动系统进行了分析和研究。在研究区识别出了断层、气烟囱、泥火山、泥底辟等聚集流体活动系统。研究区聚集流体活动系统主要特征包括:①断层与气烟囱相伴生;②气烟囱发育的区域与似海底反射(BSR)分布区域基本吻合,在气烟囱上方可以识别出一定长度的BSR;③泥底辟/泥火山导致周围和上覆地层形成了大量小尺度断层和微裂隙,中、深部流体可沿破裂带向上运移至天然气水合物稳定带内形成天然气水合物。因此,研究区聚集流体活动系统为天然气水合物发育成藏提供了流体来源,有利于天然气水合物的聚集,对于揭示天然气水合物的富集规律意义重大,能够为其他区域天然气水合物勘探提供借鉴。

关键词:台西南盆地;聚集流体;活动系统;天然气水合物;南海北部陆坡

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0280-07

Zhang X D, Yin C, Zeng F X, Zhao B. Collective fluid flow system and its implications for gas hydrate accumulation in the north slope of the South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 280-286

Abstract: Based on 3D high-precision seismic data used to analyze the collective fluid flow systems in the Taixinan Basin, a collective fluid flow system including faults, gas chimneys, mud volcano, and mud diapir was identified in the study area. The main characteristics of the collective fluid flow system in the study are manifested as follows: a, association of faults with gas chimneys; b, consistency of the development area of gas chimneys with the distribution area of Bottom Simulating Reflection (BSR), and a certain length of BSR identified above the gas chimney; c, development of a large number of small scale faults and micro-fissures in the surrounding and overlying strata resulting from mud diapirs/mud volcanoes, and formation of gas hydrate caused by upward migration of the middle and deep fluids along the rupture zone to the stable zone. Therefore, the collective fluid flow system in the study area provides a source of fluid for the development of gas hydrate, which is conducive to the accumulation of gas hydrate. It is of great significance for revealing the enrichment rule of gas hydrate and can provide references for gas hydrate exploration in other regions.

Key words: TaiXinan Basin; focused fluid; flow systems; gas hydrate; north slope of the South China sea

收稿日期:2020-05-13;修订日期:2020-12-29

资助项目:中国地质调查局项目(编号:DD20190222、DD20191007)、同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金课题(编号:MGK1920、MGK202007)、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(编号:GML2019ZD0208、GML2019ZD0207)

作者简介:张旭东(1980-),男,硕士,高级工程师,从事天然气水合物地震成像及反演研究。E-mail: zhangxd_911@126.com

流体活动系统与深水油气和天然气水合物形成关系密切,同时其对海底稳定性、海底生态系统及全球环境变化有着重要影响^[1]。流体活动系统泛指地震剖面上有明显识别特征的流体疏导体系,包括聚集流体活动系统和渗漏流体活动系统。聚集流体活动系统指在局限高渗透带发生运移的过程及疏导体系^[2-3]。渗漏流体活动系统指在面积广阔的高渗透率地层中缓慢发生的运移过程及疏导体系。本文主要研究对象为南海北部台西南盆地的聚集流体活动系统,研究区主要聚集流体活动系统包括断层、气烟囱、泥底辟、泥火山,其一般发育在低孔低渗的性能良好的盖层中,在有限范围内提供流体快速运移通道^[4-6]。

利用地震资料可以识别出不同的聚集流体活动系统,这些系统直观地反映了聚集流体从储层穿透盖层垂向或亚垂向逸散的过程。断层作为聚集流体活动系统已有较多研究^[7-8]。流体沿断层运移的直接证据是发育在断层之上的麻坑^[9-10]。断层与麻坑相连说明沿断层运移的流体通量足够大,且悬浮起海底的沉积物形成麻坑。印度 Krishna - Godavari Basin 的 NGHP-01-10 站位就是一个典型的例子^[11]。在 NGHP-01-10 站位周围并没有明显的似海底反射 (BSR),通过地震属性分析发现,NGHP-01-10 站位位于 2 套主要的共轭断裂组交会的三角形区域,而这个区域内的次级断裂在平面上呈现出多边形断层的特征,正是这个复杂的断裂系统为游离气从深部运移至水合物稳定带提供了通道^[12]。

气烟囱一般在渗透性差的细粒沉积物中以管状或丘状出现。当地层中压力较大时,在沉积地层的薄弱部位会产生大量裂隙,流体沿裂隙发生垂向运移,裂隙及其运移的流体共同造成了通过地震观察到的地震异常(如杂乱反射、空白带、弱振幅带等)^[13-14]。沉积系统和构造作用可以控制气烟囱的发生和空间分布。韩国 Ulleung Basin 气烟囱非常发育^[15-17]。在韩国已经完成的 UBGH1 和 UBGH2 两次钻探中,共有 6 个站位发现气烟囱构造,且均存在高饱和度水合物^[18-20]。

1984 年 Ginburg 等地球物理学家第一次提出水合物与海底泥火山关系问题^[21-22]。在对里海、黑海、墨西哥湾等地方研究发现,沉积物和甲烷相互结合促进了泥火山的发育,随着甲烷聚集浓度增

加,导致水合物形成。水合物普遍存在于泥火山或泥底辟附近,可以说泥火山是水合物赋存的标志之一,是水合物存在的活证据^[23-24]。20 世纪 70 年代中期,在克里米亚半岛南部的 Sorokin 海槽,首先发现了由泥岩形成的底辟褶皱^[25]。1996 年俄罗斯在 Sorokin 海槽布置了沿底辟褶皱带的调查测线^[26-27],在测线周围取到了高饱和度水合物样品,在气烟囱、泥火山、泥底辟的周围或其上往往存在许多与之伴生的裂隙或断层^[28-29],这些裂隙或断层也可作为聚集流体运移的通道^[30-31]。

中国对南海北部流体运移体系做了大量的研究^[1-2]。南海北部流体活动体系被划分为构造断层、气烟囱和泥底辟、多边形断层、海底滑坡和深水水道砂体,并讨论了它们与天然气水合物成藏的关系^[4, 28, 30]。本文研究区虽然陆续开展了较多综合地质地球物理调查,但对该区聚集流体活动系统的认识还不够系统,本文在对南海北部台西南盆地三维地震资料精细处理的基础上,对以下问题进行了研究:①对研究区不同聚集流体活动系统进行分类,并总结其地球物理特征;②研究区聚集流体活动系统对天然气水合物成藏的影响。

1 区域地质背景

台西南盆地位于南海北部东沙群岛以东地区,在南海扩张演化过程中,处于古太平洋边缘浅海环境,发育了较厚的海相沉积^[32]。研究区位于台西南盆地的中部隆起区附近(图 1-a)沿北东—南西向展布,水深变化范围在 600~2100 m 以上。海底地形地貌较复杂,主要包括海底峡谷、陆坡海丘、海底斜坡等(图 1-b)。构造演化可以分为 2 个阶段,包括始新世—渐新世裂陷阶段及新近纪—第四纪裂后热沉降阶段^[33]。西邻台湾峡谷,东接澎湖峡谷主要包括海底峡谷、陆坡海丘、海底斜坡等地貌。研究区大陆边缘由初期挤压逐渐转换为拉张构造环境^[34-35],此后由于构造隆起,在东沙群岛周围缺失晚白垩世—始新世的沉积^[36-37]。至始新世末,包括东沙群岛以东地区的整个陆坡区普遍抬升并遭受剥蚀^[38-39]。研究区大规模的烃类在温压条件适合的浅表层沉积中聚集,为天然气水合物形成与赋存提供理想场所^[40-44]。

2 研究区聚集流体活动系统类型

研究区高精度三维地震采集的接收道数为 192

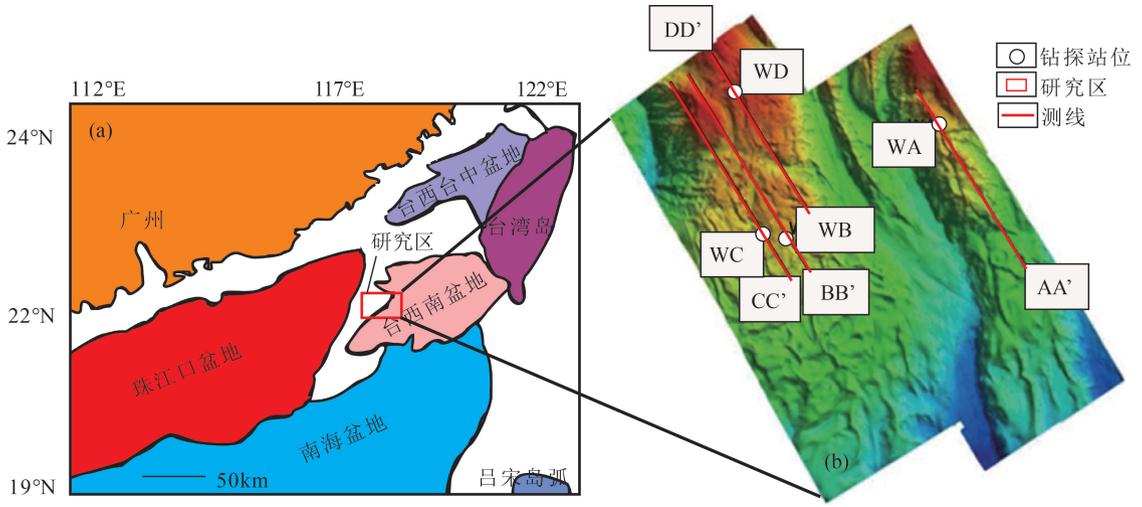


图1 研究区位置图(a)及其海底地貌特征(b) (AA'、BB'、CC'、DD'分别为图2、图3、图4、图8对应测线, WA、WB、WC、WD分别为4个钻探站位)

Fig. 1 Location of the study area(a)and its topographical features(b)

道,炮间距 25 m,道间距 12.5 m,采样率 1 ms,记录长度 5 s,震源容量 540 Cu.in.,面元为 12.5 m×50 m。在处理过程中对该资料针对天然气水合物处理流程及参数,在保真、保幅、高分辨率、高信噪比基础上,采用噪音压制、子波处理、多次波压制、高密度速度分析、叠前时间偏移等处理技术,开展了中浅层保真去噪、高精度成像处理,使处理后浅部目标层段细节刻画更突出,中深层整体结构成像更清楚,频带明显拓宽,低频信息丰富,分辨率明显提高。

断层是岩层或岩体顺破裂面发生明显位移的构造。构造断层在活动期时,流体在内外压力差的作用下沿断层向浅部低压地层运动;而在构造断层活动间歇期,流体运动动力以剩余压力为主,其疏

导能力下降。气烟囱指源岩或早期圈闭在压力平衡打破之后,流体泄压通过上覆地层,使上覆地层不均匀含气及含有携带物,导致地震波扭曲,在地震资料上形似烟囱的现象。泥火山和泥底辟都是地球深部物质受到地质应力驱动上拱的地质构造,不同的是,泥火山是喷出或流出海底形成的正地貌,而泥底辟通常上拱或刺穿进入浅部地层。

2.1 断层

研究区断层构造呈现出总体向南东倾,垂向断距下陡上缓,沉积层从西北向东南呈喇叭状发散、增厚的特点。多数断层近似直立陡倾状分布,个别向上直达海底。图2中钻井站位 WA 位于 CDP900 处,在 WA 站位左侧和下方存在深大断层,可以作

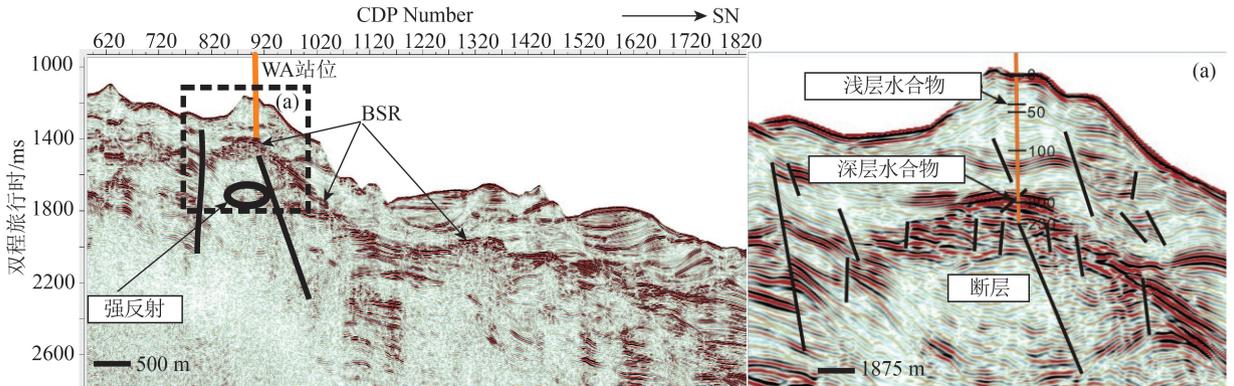


图2 断层地震反射特征

Fig. 2 Seismic reflection characteristics of fault

为深部流体向上运移的通道。WA 站位水深约 870 m, 下方 BSR 附近反射杂乱, 上方存在明显的振幅空白带。图 2 放大图(右图)中识别出多个小断层, 分布于 WA 站位两侧, 分别是深部流体通往浅、深 2 个含天然气水合物层的有效运移通道, 这一浅一深 2 个含天然气水合物层与钻井结果吻合。

2.2 气烟囱

研究区含气烟囱地震剖面表现为弱振幅、弱连续性特征, 局部表现出强振幅、连续的特征和同相轴下拉现象。既可形成垂向泄压的底辟伴生构造, 也可形成侧向泄压的层间伴生构造。研究区深大断裂较少, 而第四纪的小断裂较发育, 主要存在于气烟囱的顶部和两侧, 为流体的侧向和垂向运移提供了良好的疏导体系, 有利于天然气水合物的成藏。共识别出 5 处气烟囱构造(图 3), 具有明显的垂向柱状特征, 气烟囱上方存在震相混乱强反射, 说明流体随着气烟囱向上运移到顶界面。气烟囱主要发育在 BSR 之下(图 3), 而在 BSR 上方没有明显的显示, 而且气烟囱发育的区域与 BSR 分布区域基本匹配, 说明流体在向上运移过程中, 在 BSR 处发生富集形成天然气水合物, 而天然气水合物又可以下伏气体形成遮挡, 促使游离气在 BSR 下部聚集。从图 4 可以看到, 1~4 号气烟囱水平距离较近, 5 号气烟囱较远, 但在根部这些气烟囱在水平方向上是连在一起的, 组成脉状气烟囱构造, 气烟囱构造上方附近存在 3 个麻坑, 在图 3 右侧地形图上得到验证。其中, 较大的 5 号气烟囱根部横向尺寸

约 620 m, 较小的 3 号气烟囱根部横向尺寸约 83 m (由于地震测线不一定刚好经过气烟囱中心, 所以这个尺寸不一定表示气烟囱直径)。5 号气烟囱位置上方有一个钻井站位 WB, 水深约 1130 m。钻探结果显示, 在海底以下约 200 m 处发现高饱和度的扩散型天然气水合物, 说明其下部气烟囱构造是良好的气体运移通道。

2.3 泥底辟

研究区泥底辟在侵入过程中, 沉积物和流体伴随上侵, 大量流体发生运移, 造成泥底辟通道周围地层和泥底辟之上地层出现强振幅异常, 同时也会使上部地层因张力而形成很多小的正断层, 这些断层也是良好的运移通道, 使泥底辟运移来的流体进一步迁移。图 4 放大图(右图)可以识别出 2 处典型泥底辟构造, 其在地震剖面主要表现为内部反射杂乱, 通道周围地层及泥底辟上部地层表现为上倾作用造成的被动褶皱的地震反射形态, 而且泥底辟周围地层和泥底辟上部地层会产生强振幅异常。在距离靠右侧泥底辟构造 650 m 处的构造隆起处有一个钻井站位 WC, 位于 CDP657 处, 该站位存在一浅一深 2 个天然气水合物储层。该站位下方对应一个较大的气烟囱构造, 泥底辟下方聚集流体沿气烟囱向上运移, 当运移至泥底辟处时, 由于泥底辟处沉积层厚实, 流体无法继续向上运移, 高通量流体侵入上覆地层形成泥底辟。沉积物和流体混合物在泥底辟作用下上侵, 形成天然气水合物储层。因此该站位虽然在泥底辟右侧, 但是其下方聚集流体

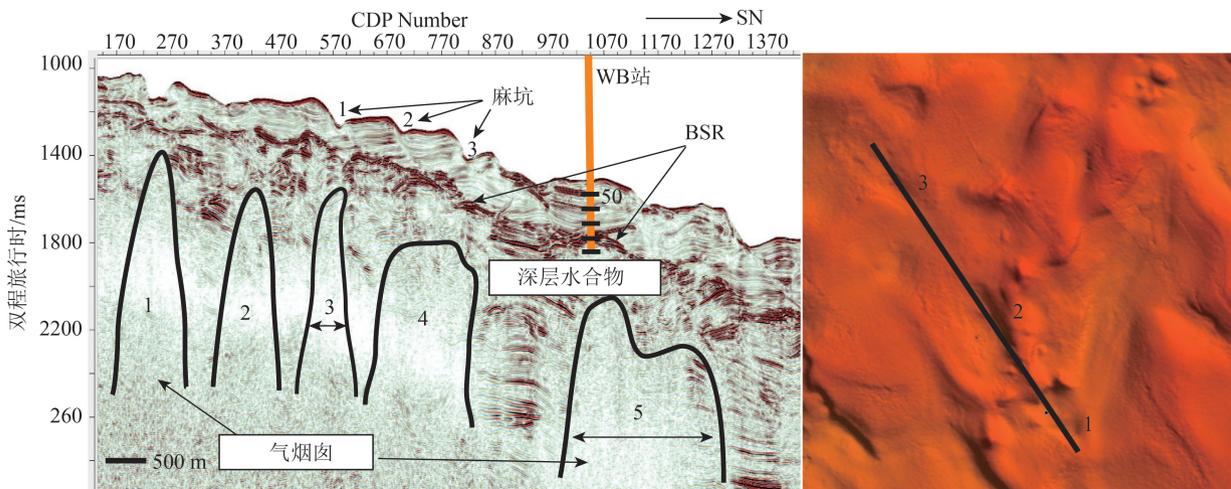


图 3 气烟囱地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of gas chimney

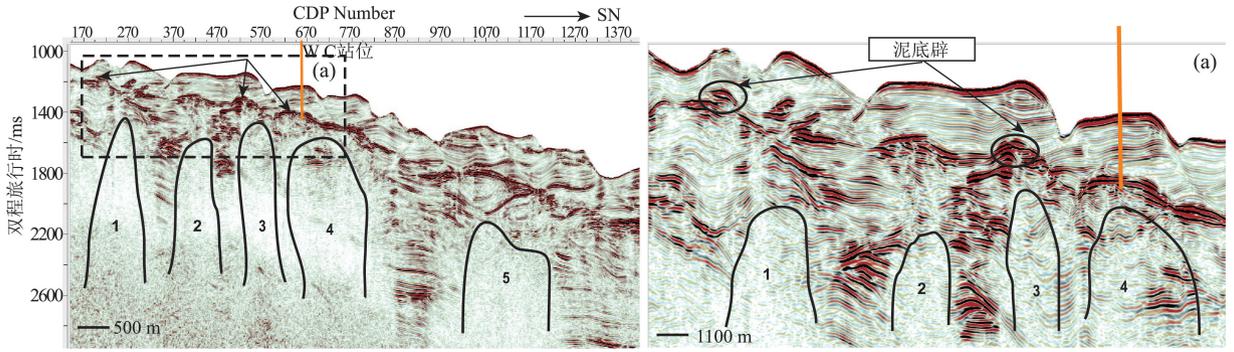


图4 泥底辟地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflection characteristics of mud diapir

运移体系一致,能间接证明泥底辟构造对流体运移的重要性。

2.4 泥火山

研究区泥火山数量不多,但比较典型。泥火山在地震反射特征上与泥底辟相似,在通道部位一般反射杂乱或者空白反射,少数表现为“下拉”反射。泥火山顶部常伴有强振幅地震反射异常,预示着浅层气体或碳酸盐岩结壳存在。图5中钻井站位WD处于泥火山右侧翼的海底地貌高部位,从图5局部放大显示可以看到泥火山下方有气烟囱,为沉积物上涌提供通道,流体由此通道向上运移并渗出海底。泥火山下方气烟囱通道明显,说明下方流体向上运移至海底并在海底继续渗漏形成泥火山。

3 研究区聚集流体活动系统对天然气水合物成藏的指示意义

台西南盆地地质构造复杂,沉积厚度大,生烃能力强,局部具有高热流、超压、快速沉积的特点。

聚集流体活动系统在区域内广泛分布。深部的热解成因气、浅部的生物成因气或两者混合气,沿断层、泥火山、泥底辟、气烟囱等构造通道运移至天然气水合物稳定带,形成构造圈闭型天然气水合物藏。可以说,台西南盆地既具备天然气水合物气体来源,又具备种类丰富的聚集流体运移通道。

研究区聚集流体活动系统并不单独存在,大多相伴相生。如图2所示,深部生物成因流体通过构造断裂运移至天然气水合物稳定带底界,形成较深的天然气水合物层,当其下方流体来源充足,而且上方存在小断层,使深部流体继续向上运移至浅部,当浅部断层连通至海底时,便在海底形成麻坑、泥底辟或水合物丘,通常在浅部还会伴随着BSR和强振幅异常。如图3所示,气烟囱作为一种流体的泄压通道,其带至浅层的热流体即可作为浅层有机质向烃类转化的催化剂,其本身含有的热成因烃类气又可作为天然气水合物气体来源之一。站位下方的气烟囱群说明流体来源充足。深部流体沿气

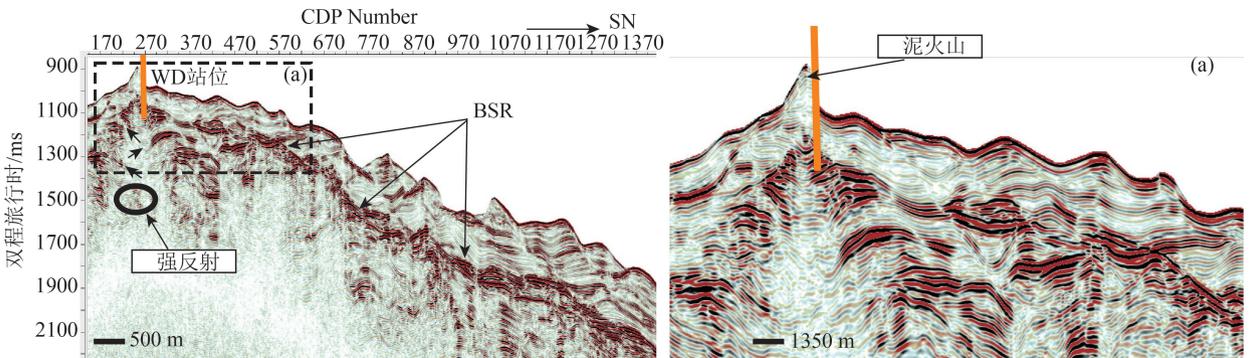


图5 泥火山地震反射特征

Fig. 5 Seismic reflection characteristics of mud volcano

烟囱向上进入天然气水合物稳定带,形成天然气水合物富集区,少部分流体沿断层继续向上运移到达海底形成凹坑等构造。如图4所示,泥底辟下方也存在气烟囱群现象,有丰富的流体来源。研究区泥底辟在侵入过程中,沉积物和流体伴随上侵,大量流体发生运移,造成泥底辟通道周围地层和泥底辟之上地层出现强振幅异常。当沉积物和流体运移至天然气水合物稳定带时,由于上覆盖层隔档而停止,未能继续向上运移至海底。但是上倾也会使上部地层因张力而形成很多小的正断层,这些断层也是良好的运移通道,使泥底辟运移来的流体进一步迁移,这些流体渗漏出海底便形成多个凹坑。如图5所示,站位下方同样存在气烟囱现象,流体来源丰富。泥火山携带流体的泥质沉积物上侵涌出海底后堆积而成,在其发育过程中对地层有强烈的侵蚀作用,泥火山形成过程会造成大量流体渗出海底。部分泥火山形成后遗留的侵蚀通道也可作为流体继续向上运移的重要通道。

4 结论

根据研究区高精度的三维地震资料分析,识别出大量聚集流体活动系统,如断层、气烟囱、泥底辟、泥火山等。研究区天然气水合物高效聚集流体运移体系对本文所述站位的高饱和度天然气水合物层的形成至关重要。总结研究区聚集流体运移特征,可得出如下结论。

(1)研究区中部断层比两侧发育规模更大、更集中。大部分断层近似直立陡倾状分布。断层总体向南东倾,垂向断距下陡上缓,沉积层也从西北向东南呈发散状。研究区断层发育与气烟囱伴生,断层对通过气烟囱并运移到气烟囱顶部的流体继续向上运移起到渗漏的关键作用,当它们运移到浅部地层中的气体通量足够时,即可形成天然气水合物。

(2)研究区气烟囱主要表现为弱振幅、弱连续性特征,局部表现出强振幅、连续的特征和同相轴下拉现象,气烟囱基本呈垂向分布。气烟囱发育的区域与BSR分布区域基本吻合,气烟囱发育部位上方可以识别出一定长度的BSR,表明气烟囱与天然气水合物形成关系密切。

(3)研究区泥火山/泥底辟的发育走向与区域构造走向一致,其内部缺乏地层反射结构,呈声空白反射特征。研究区泥底辟/泥火山作用使周围和

上覆地层形成了众多断层和微裂隙,中、深部流体沿破裂带向上运移至稳定带内形成水合物。与泥底辟/泥火山聚集流体活动系统有关的水合物通常环绕在其构造周围赋存,分布面积较小且连续性较差。

致谢:对参与野外地质调查航次工作的同事和审稿专家表示诚挚感谢。

参考文献

- [1] 孙启良,吴时国,陈端新,等.南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义[J].地球物理学报,2014,57(12):4052-4062.
- [2] 吴能友,杨胜雄,王宏斌,等.南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J].地球物理学报,2009,52(6):1641-1650.
- [3] 王秀娟,吴时国,王大伟,等.琼东南盆地多边形断层在流体运移和天然气水合物成藏中的作用[J].石油地球物理勘探,2010,45(1):122-128.
- [4] 吴时国,孙启良,吴拓宇,等.琼东南盆地深水多边形断层的发现及其油气意义[J].石油学报,2009,30(1):22-26.
- [5] 杨涛涛,吕福亮,王彬,等.琼东南盆地南部深水区气烟囱地球物理特征及成因分析[J].地球物理学进展,2013,5(2):2634-2641.
- [6] 尹川,张金森,骆宗强,等.气烟囱模式识别技术在油气运移通道检测中的应用[J].地球物理学进展,2014,3(1):1343-1349.
- [7] 梁劲,王静丽,杨承志,等.珠江口盆地东部海域含天然气水合物沉积层的地球物理特征[J].天然气工业,2017,37(2):126-133.
- [8] 徐华宁,陆敬安,梁金强.珠江口盆地东部海域近海底天然气水合物地震识别及地质成因[J].地学前缘,2017,24(1):1-9.
- [9] 沙志彬,许振强,付少英,等.珠江口盆地东部海域天然气水合物成藏气源特征探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(4):116-125.
- [10] 梁金强,付少英,陈芳,等.南海东北部陆坡海底甲烷渗漏及水合物成藏特征[J].天然气地球科学,2017,28(5):761-770.
- [11] Sibson R. H. Fluid flow accompanying faulting, field evidence and models[C]//Simpson D W, Richards P G. Earthquake prediction an international review. American Geophysical Union Maurice Ewing Series, 1981, 4: 593-603.
- [12] Downey M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68: 1752-1763.
- [13] Cartwright J, Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 126-140.
- [14] O' Brien G W, Lisk M, Duddy I R, et al. Plate convergence, foreland development and fault reactivation: Primary controls on brine migration, thermal histories and trap breach in the Timor Sea, Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 533-560.
- [15] Finkbeiner T, Zoback M F, Stump B. Stress, porepressure, and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Island 330 field, northern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85: 1007-1035.
- [16] Heggland R. Detection of gas migration from a deep source by the

- use of exploration 3D seismic data[J].Marine Geology,1997,137: 41-47.
- [17] Ligtenberg J H.Detection of fluid migration pathways in seismic data: Implications for fault seal analysis[J].Basin Research,2005,17: 141-154.
- [18] Riedel M, Collett T S, Kumar P, et al.Seismic imaging of a fractured gas hydrate system in the Krishna-Godavari Basin offshore India[J]. Marine and Petroleum Geology,2010,27: 1476-1493.
- [19] Long D, Lammers S, Linke P, Gas hydrates relevance to world margin stability and climate change[J].Geophysics Research,2011,2: 55-68.
- [20] 许翠霞, 边海光, 马朋善, 等. 气烟囱的地球物理响应特征及油气勘探[J].地球物理学进展,2014,29(4): 1831-1836.
- [21] Yoo D G, Kang N K, Yi B Y, et al. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea[J].Marine and Petroleum Geology,2013,47: 236-247.
- [22] 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: 531-534.
- [23] Chun J H, Ryu B J, Son B K, et al. Sediment mounds and other sedimentary features related to hydrate occurrences in a columnar seismic blanking zone of the Ulleung Basin, East Sea, Korea[J].Marine and Petroleum Geology,2011,28: 1787-1800.
- [24] Kim G Y, Yi B Y, Yoo D G, et al. Evidence of gas hydrate from downhole logging data in the Ulleung Basin, East Sea[J].Marine and Petroleum Geology,2011,28: 1979-1985.
- [25] Ryu B J, Collett T S, Riedel M, et al.Scientific results of the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin (UBGH2) [J]. Marine and Petroleum Geology,2013,47: 1-20.
- [26] 拜阳, 宋海斌, 关永贤, 等. 利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因[J].地球物理学报,2014,7(5): 2208-2222.
- [27] 邱鹏飞, 黄华谷, 黄保家, 等. 莺歌海盆地海底麻坑的形成与泥底辟发育和流体活动的关系[J].热带海洋学报,2012,5(4): 26-36.
- [28] 关永贤, 罗敏, 陈琳莹, 等. 南海西部海底巨型麻坑活动性示踪研究[J].地球化学,2014,6(2): 628-639.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 解习农, 李思田, 胡祥云, 等. 莺歌海盆地泥一流体底辟树型输导系统及其成因机制[J].中国科学: D 辑地球科学,1999,29(3): 247-256.
- [32] 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现与识别[J].地球科学(中国地质大学学报),2006,31(2): 209-2135.
- [33] Ginsburg G D, Ivanov V L, Soloviev V A. Natural gas hydrates of the world's oceans[J].Oil and Gas Content of the World's oceans.PGO Sevmorgeologia,1984,3: 141-158.
- [34] Ginsburg G D. Gas hydrate accumulation at the Hakon Mosby mud volcano[J].Geo-marine Letters,1999,19: 57-67.
- [35] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J].Marine Geology,2000,167: 29-42.
- [36] Bouriak S, Vanneste M, Saoutkine A. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Voring Plateau, offshore Norway[J].Marine Geology,2000,163: 125-148.
- [37] Egorov A V, Grane K, Vogt P R, et al. Gas hydrates that outcrop on the sea floor: Stability models[J].Geo-marine Letters,1999,19: 68-75.
- [38] 于兴河, 张志杰, 苏新, 等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J].地学前缘,2004,11(1): 311-315.
- [39] 宋海斌, 郝天珧, 江为为, 等. 南海地球物理场特征与基底断裂体系研究[J].地球物理学进展,2002,17(1): 24-32.
- [40] 陈多福, 苏正, 冯东, 等. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素[J].热带海洋学报,2005,24(3): 39-45.
- [41] 苏丕波, 何家雄, 梁金强. 南海北部陆坡深水区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.
- [42] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征[J].地学前缘,2017,24(4): 24-31.
- [43] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安. 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.
- [44] 张伟, 梁金强, 何家雄, 等. 南海北部神狐海域 GMGS1 和 GMGS3 钻探区天然气水合物运聚成藏的差异性[J].天然气工业,2018, 38(3): 138-149.