

南海北部琼东南海域气烟囱发育特征及其对水合物形成与分布的影响

王静丽^{1,2,3,4}, 梁金强^{2,3,4}, 沙志彬^{2,3,4}, 尚久靖^{2,3,4}

(1 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074; 2 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075; 3 中国地质调查局天然气水合物工程技术中心, 广州 510075; 4 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要:琼东南海域地震资料解释发现了 BSR(似海底反射)、BSR 下伏强反射及烟囱体等天然气水合物的地震响应特征。研究发现, 区内气烟囱的分布与 BSR 的分布存在明显的相关性, 气烟囱是气体垂直运移的主要通道, 气体垂直向上运移至水合物稳定带大量聚集, 从而形成水合物。因此, 精细刻画研究区气烟囱发育特征对于区内天然气水合物成藏及分布研究具有重要意义。传统气烟囱识别方法只通过地震剖面上的弱反射或相关属性分析, 笔者利用基于 MLP 算法的神经网络, 高效地分析了本区域气烟囱的分布, 并根据烟囱与 BSR 分布之间的关系, 分析了气烟囱对天然气水合物形成及分布的影响。

关键词:琼东南海域; 气烟囱; 天然气水合物成藏

中图分类号:P736.5

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.03001

气烟囱是活动热流体泄压的通道, 具有幕式张合的特点, 与油气生成、运移密切相关, 在地震剖面上表现出明显的反射异常。由于其形似烟囱, 又具有烟囱效应, 故命名为气烟囱^[1,2]。

以往油气勘探发现, 南海琼东南盆地天然气资源量丰富, 发育大量泥底辟和气烟囱, 临近的莺歌海盆地中泥底辟(泥火山)是油气成藏最重要的构造模式之一^[3-6]。广州海洋地质调查局在琼东南海域开展了广泛的天然气水合物勘查工作, 发现了多处 BSR、冷泉、麻坑等水合物赋存的直接或间接证据, 证明了区内天然气水合物的存在^[7]。同时, 水合物勘探工作揭示了琼东南海域气烟囱的发育与天然气水合物成藏之间存在密切关系。

本文选取琼东南海域天然气水合物调查区内发育的气烟囱为研究对象, 通过地震反射特征及神经网络技术来综合识别气烟囱, 揭示其在研究区的发育特征及其对天然气水合物成藏的影响。

1 研究区概况

琼东南盆地位于南海北部陆坡的西北部, 海南岛南部陆缘与西沙群岛之间的海域, 是在加里东、燕山期褶皱基底上形成的新生代断陷盆地。研究区位于琼东南盆地西南部, 覆盖了琼东南盆地的部分深水区。构造上位于乐东—陵水凹陷以南, 南方隆起带西部, 总体上包括了甘泉凸凸起及其以西区域(图 1)。区内海底地貌非常单一, 为宽缓的海底平原, 整体上具有西高东低的特征, 但坡度非常小, 仅约 0.02°。

研究区经历了 2 个阶段的构造演化: 古近纪裂陷及第四纪拗陷^[8-10], 裂陷期始于始新世, 由于多凹多隆格局的存在, 使得多物源特征十分突出。

收稿日期:2016-11-28

基金项目:中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(TPR-2014-15); 中国地质调查局项目(GZH201100303, GZH201100305)

作者简介:王静丽(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海域天然气水合物地质研究工作. E-mail:jlwang@hydz.com

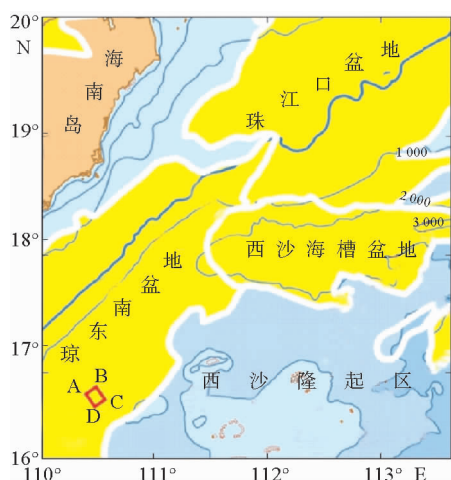


图 1 研究区位置

(红框为研究区范围, A、B、C、D 为研究区四角)

Fig. 1 Location of the study area

(red box is study area, A, B, C, D are corners of the study area)

拗陷期开始于早中新世中期,形成一系列 NE 向断层。近 5 Ma 年以来,南海北部大陆边缘南北两侧构造相对稳定,但东西两端的构造运动明显增强。同时造成莺歌海盆地强烈的构造变形,并延伸影响到了琼东南盆地。一个显著的特征就是琼东南盆地内广泛发育底辟和气烟囱。

琼东南盆地新生代沉积平均沉积厚度 > 3 000 m,最大达 8 000 m 以上,新近系厚度大于古近系。古新近系沉积以 21 Ma 巨大不整合为界可以划分出 2 个沉积构造层,即古近系的裂陷沉积和新近系的拗陷沉积。在古近纪裂陷阶段,盆地依次沉积了始新统陆相岭头组、下渐新统海陆过渡相崖城组、上渐新统滨—浅海相陵水组;进入新近纪拗陷阶段,盆地接受了从滨浅海相到深海相的连续沉积,海水深度逐渐加深,沉积地层包括下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组。其中,盆地深水区中央拗陷带发育始新世湖相和渐新统海陆过渡相—滨浅海相 2 套主力烃源岩,渐新统崖城组海岸平原相含煤烃源岩富含陆源有机质,以腐殖型干酪根为主,有机质丰度高切处在成熟—高熟热演化阶段,具有良好的生气潜力。上中新世、上新世、更新世—全新世沉积环境由三角洲逐渐过渡为浅海—半深海,沉积物粒度偏细^[11,12]。何家雄等^[3]对琼东南海域及其相邻海域的油气钻井资料研究表明,

第四系—上新统莺歌海组海相粉细砂岩或泥质粉砂岩是良好的生物气源岩,在现场气测录井过程中,浅层气测异常显示非常明显,气体组成以生物甲烷居绝对优势。

2 气烟囱的识别

2.1 地震反射特征

地震资料是识别气烟囱最主要、最直观的资料。传统的气烟囱识别主要是根据气烟囱地震反射特征,通过人工的浏览地震剖面来识别气烟囱。在地震剖面上,气烟囱外侧地层没有发生变形,两侧的岩层也没有明显位移。整体表现为反射成像明显变差、空白反射的条带,形状多为柱状或者倾斜柱状。内部含气导致反射波同相轴连续性变差,总体为弱振幅、弱连续或反射波突然杂乱振幅明显减弱的区域;局部富气的层段与上下层界面波阻抗差较大,出现强振幅反射,气体常常聚集在烟囱顶部,使其顶界面呈连续强振幅反射;气体的存在导致地震波速度降低,地震反射同相轴出现下拉现象(图 2)。

2.2 多波束、浅剖资料

多波束资料识别出的海底麻坑、丘状体等微地貌特征结合浅地层剖面上的声空白也是作为气烟囱识别有效手段。麻坑是海底表面麻点状、凹坑状构造,是海底冷泉活动的标志,普遍分布于琼东南、莺歌海盆地。麻坑是由底辟多期次活动及天然气等流体的垂向运移及喷发形成的,其发育常伴有泥火山、气烟囱等,从深到浅呈现气烟囱—微洼陷—麻坑的组合样式。穿过麻坑的浅地层剖面显示,麻坑周围存在大量高角度的声空白反射现象,且声空白周围可见叠加的增强反射层。而在地震剖面上,则显示麻坑正下方浅部存在 BSR 反射,深部则出现反射杂乱的气烟囱,气烟囱的周围可见增强反射层^[7](图 3)。

2.3 神经网络气烟囱识别技术

神经网络气烟囱识别是对地震数据进行中值倾角滤波,通过拾取气烟囱样本点计算各点各属性值来训练神经网络,挑选出最能反映气烟囱体

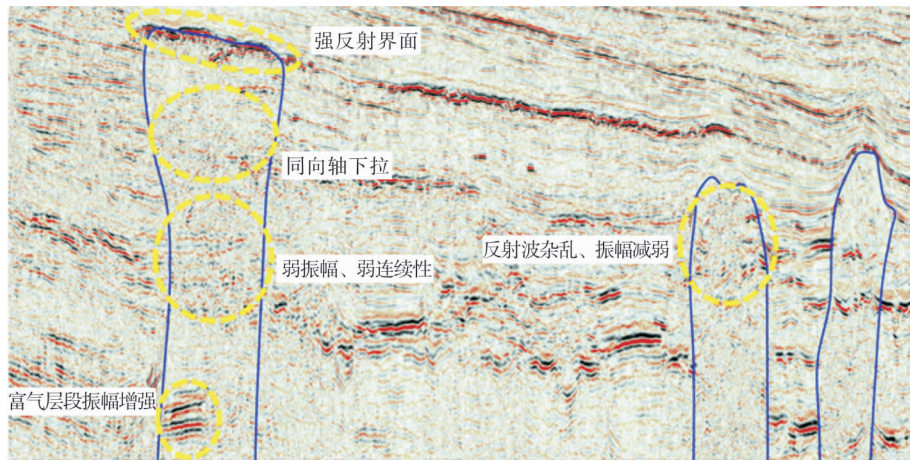


图 2 气烟囱地震反射特征

Fig. 2 Seismic reflection features of gas hydrate

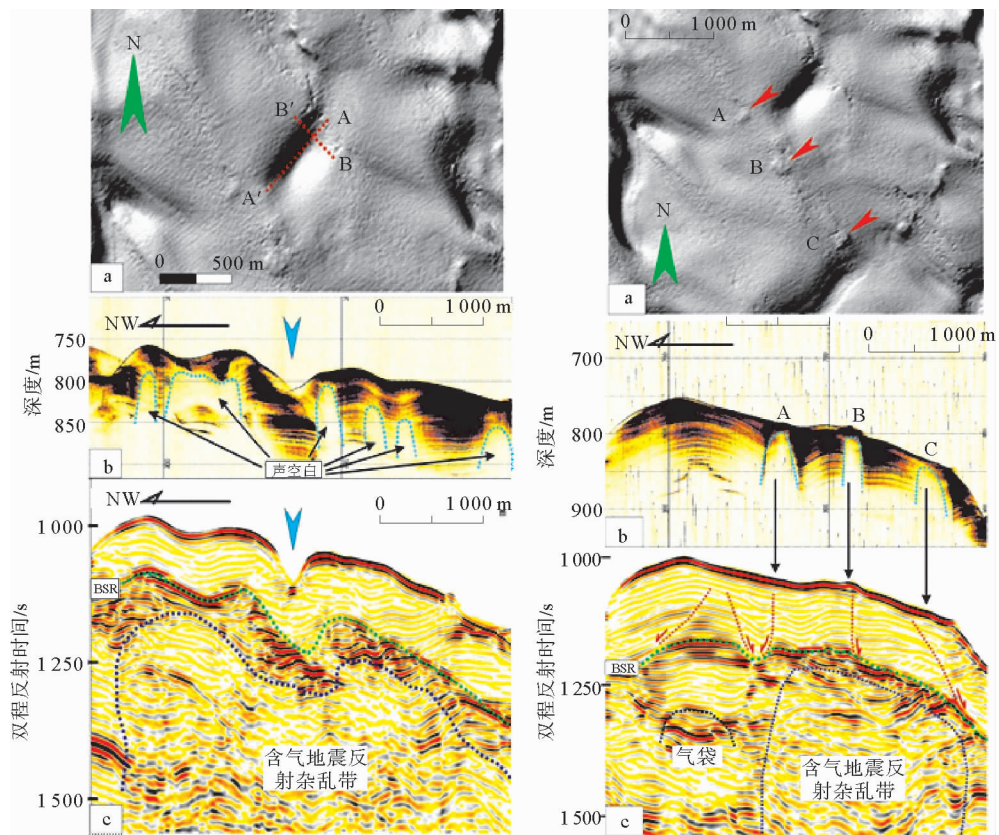


图 3 气烟囱与麻坑及丘状体(据文献[7])

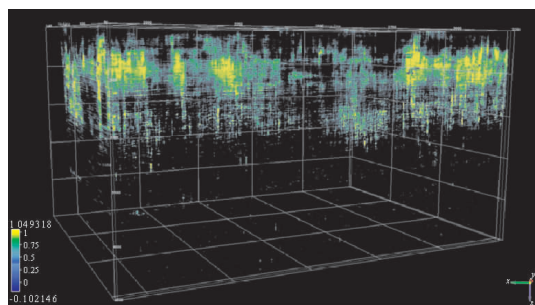
Fig. 3 Gas chimney, pockmark and domal body (from reference [7])

的地震属性,然后将神经网络的计算结果应用到整个数据体中,且能够精确、高效地识别气烟囱^[13]。本应用基于倾角数据体的神经网络地震体识别思路,首先将原始地震数据体转化为倾角

数据体,再在典型剖面上拾取气烟囱点和非气烟囱点作为样本;然后建立属性集(包括振幅、相位、相干、能量等),将所创建的属性用于神经网络培训和误差分析,得到对气烟囱最敏感的属性集,再

应用到全区得到了气烟囱体(图 4)。

此技术克服了常规气烟囱识别耗时久的缺点,从整体上刻画了气烟囱的展布,并且可以突出细节。利用神经网络技术对气烟囱进行识别,可以发现气烟囱发育区表现明显的区别于正常地层的高值(图 4)。



注:在进行神经网络训练时气烟囱点取值为 1;非气烟囱点取值为 0;将神经网络应用于整个数据体进行识别,输出值越大代表其是气烟囱的可能性越高

图 4 神经网络技术识别的气烟囱体

Fig. 4 Gas hydrate cube recognized by neural network

3 研究区气烟囱发育特征

研究区位于琼东南盆地,邻近莺歌海盆地典型泥底辟发育区,类似泥底辟现象也广泛发育。区内发育的气烟囱在地震剖面上表现为反射模糊区(带),没有常规泥底辟所常常具有的围岩地层牵引现象或者只是在底辟的根部才有很小规模的地层牵引现象,但大部分烟囱体内地震反射同相轴有较为明显向下弯曲现象,是气体运移的通道。以刺穿 T_1 反射界面为准进行统计,研究区内共推断识别了 12 处气烟囱发育区,总面积为 34.16 km²,其中最大的一处面积达 12.13 km²。气烟囱在整个调查区均有分布,但北部较南部更为集中(图 5)。气烟囱大部分刺穿了 T_3 — T_1 的各个反射界面,有部分还是晚中新世以来才开始发育的,但本次调查没有发现刺穿至海底的气烟囱存在。

区内气烟囱发育主要表现为以下特征:

(1) 气烟囱集中发育在海底以下 2 100 ~ 3 200 ms 范围内(图 4),即晚中新世以来气烟囱较为发育。

(2) 气烟囱多发育于琼东南水合物调查区古

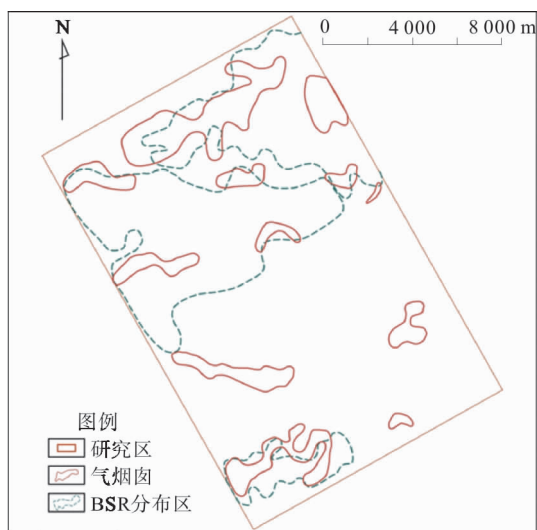


图 5 BSR、气烟囱叠合平面图

Fig. 5 Plane view of BSR and gas chimney

近纪以来的构造高部位,个别气烟囱内部还发育明显的直达古近纪的断裂,有的断裂甚至向上延伸至气烟囱内部。

(3) 研究区发育的气烟囱还表现为围岩变形很小或未变形,围岩变形小是气烟囱现象有别于其他相似构造的重要特征之一。除发育成泥丘的气烟囱顶部有比较弱的横弯褶皱外,周边的围岩几乎没有发生变形,两侧的岩层也没有明显位移(图 6)。

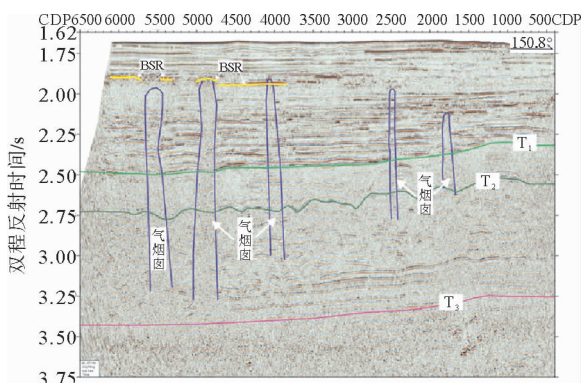


图 6 研究区典型气烟囱剖面

Fig. 6 Typical seismic profile of gas chimney in study area

(4) 平面上,气烟囱走向与 T_3 断层走向基本一致,以 NE 向为主,全区均有发育,靠近莺歌海

盆地的烟囱规模更大。剖面上,气烟囱多呈直立产状分布,刺穿 T_3-T_1 的各套地层,部分向下延伸至 T_3 (中中新统一上中新统分界) 以下,向上多呈直立烟囱状、柱状,个别发散呈囊状、花状(图5)。

4 气烟囱与水合物成藏的关系

研究区发育的这种气烟囱应是深部高温—高压流体向上运移的表现,是流力破裂和流体活动所形成的构造,伴有大量深部流体快速向浅层运移。中深部高温、高压流体在不断向上运移过程中,随流体的逸散,温度、压力下降,流体主要通过小规模断层、裂缝运移。当流体运移至浅部地层时,可能因为浅层砂岩或含砂层的存在而产生部分的侧向运移,气烟囱内同相轴下拉是天然气充注造成低速异常所致。研究区内新近纪以来缺少直达古近纪的大型烃源断裂,区内的天然气主要是利用气烟囱进行运移的,当大量天然气运移遇到温度、压力和地层合适的区域,即可形成水合物矿藏。同时,气烟囱在形成过程中携带大量富含甲烷气的流体向上运移到天然气水合物稳定带,形成之后仍可作为后期活动的油气向上运移的特殊通道。

在神经网络技术识别出的气烟囱剖面上,可见直立烟囱状、柱状流体运移特征显示明显,BSR集中发育于气体运移通道的上部(图7)。在晚中新世—上新世以后研究区发生了流体大规模运移,且以垂向运移为主,区内发育大量气烟囱。部分地区流体垂向运移到第四系时停止,致使气烟

囱发育范围变小。 T_1 界面以上,BSR集中发育在气烟囱之上,说明以气烟囱为通道的流体运移决定了水合物的成矿位置。在BSR以上则没有的明显流体运移显示,说明由于水合物形成降低了地层的渗漏率,气体携带的能量很难使其继续向上运移至海底。由此可以初步认为,气体在运移过程中在BSR附近存在富集。

对比BSR、气烟囱发育区叠合平面图,可以发现BSR与气烟囱分布存在有极大相关性,BSR或者集中发育于气烟囱上部,或其旁有不同发育规模的气烟囱存在(图5),特别是两者发育的走向几乎一致,说明气烟囱的发育控制了研究区水合物聚集成藏的部位。气烟囱是本区流体运移的一种主要形式,但也有气烟囱与BSR分布不一致的区块,推测应是中深部流体运移至浅层后,因浅层沉积有含砂率较高、孔隙度较大的层位存在,而其上又有泥岩覆盖的原因,引起流体的侧运移所致。

5 结论

(1)气烟囱是研究区流体垂向运移的重要形式,利用神经网络气烟囱模式识别技术可以更清晰有效地刻画气烟囱的空间展布特征。

(2)研究区BSR集中发育于刺穿第四系的气烟囱之上,没有气烟囱发育的部位,则很少有BSR;BSR与气烟囱发育的走向几乎一致,二者之间存在明显的相关性。

(3)研究区内气烟囱作为深部气体向浅部运移的有效通道,控制了天然气水合物成藏与分布的范围,是区内水合物成藏的重要控制因素。

参考文献:

- [1] 张为民,李继亮,钟嘉猷,等. 气烟囱的形成机理及其与油气的关系探讨[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 449-456.
- [2] 梁全胜,刘振,王德杰,等. 气烟囱与油气勘探[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 288-290.
- [3] 何家雄,祝有海,翁荣南,等. 莺歌海盆地油气渗漏系统及油气勘探前景[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2010, 32(1): 1-10.
- [4] 李绪宣,朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- [5] 王秀娟,吴时国,董冬冬,等. 琼东南盆地气烟囱构造特点及其与天然气水合物的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,

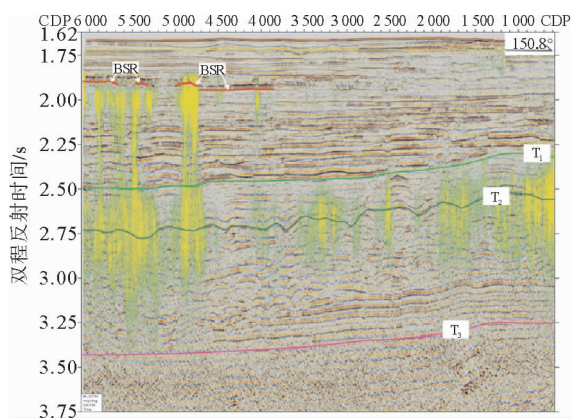


图7 气烟囱流体模式识别图

Fig. 7 Fluid pattern recognized by gas chimney

- 2008, 28 (3): 103-108.
- [6] 杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 等. 琼东南盆地南部深水气区地球物理特征及成因分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (5): 2634-2641.
- [7] 尚久靖, 吴庐山, 梁金强, 等. 南海东北部陆坡海底微地貌特征及其天然气渗漏模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 288-290.
- [8] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 543-549.
- [9] 朱伟林, 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 101.
- [10] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 84-85.
- [11] Zhang W, He J X, Lu Z Q, 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. doi: 10. 1174/j. issn. 1672-1926. 2015. 11. 2185.
- [12] 张伟, 何家雄, 李晓唐, 等. 南海北部边缘琼东南盆地含油气系统[J]. 地质科学与环境学报, 2015, 37(5): 80-91.
- [13] 高磊, 陈文雄, 薛明星. 渤海 A 油田气烟囱识别及其研究意义[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 675-680.

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS OF GAS CHIMNEY AND ITS EFFECT ON FORMATION AND DISTRIBUTION OF NATURAL GAS HYDRATE IN THE QIONGDONGNAN AREA, NORTHERN SOUTH CHINA SEA

WANG Jingli^{1,2,3,4}, LIANG Jinqiang^{2,3,4}, SHA Zhibin^{2,3,4}, SHANG Jiujiang^{2,3,4}

(1 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences, Ministry of Education, Wuhan 430074, China;

2 MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 510075, China;

3 Natural Gas Hydrate Engineering Research Center, Guangzhou 510075, China;

4 Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Seismic indicators of gas hydrate, such as the BSR (Bottom Simulating Reflector), bright reflector under BSR and chimney, have been found in the Qiongdongnan area by seismic survey. There is significant correlation between the development of chimney and the distribution of BSR. Chimney is the main pathway for natural gas to migrate vertically to the HSZ (Hydrate Stability Zone), which offers favorable conditions for massive gas accumulation. Therefore, it is very important to reveal the development characteristics of gas chimneys in order to study of the accumulation and distribution of gas hydrate in the area. Differ from the traditional method to recognize gas chimney with seismic data based on columnar shape, weak reflection and other related attributes, this paper comprehensively studied the development characteristics of gas hydrate by neural network analysis technology and the correlation between gas chimney and the BSR.

Key words: Qiongdongnan area; gas chimney; gas hydrate accumulation