

分形在南海北部陆坡断裂与天然气水合物关系研究中的应用^{*}

姚衍桃, 詹文欢

(中国科学院边缘海地质重点实验室//南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘 要: 根据分形几何学的原理, 利用数盒子法计算了南海北部陆坡断裂的平面分布分维值, 并以此探讨了断裂与天然气水合物的关系, 结果表明: 属被动陆缘的北部陆坡断裂越发育水合物异常越少, 而属主动陆缘的台西南则断裂越发育水合物异常就越多。这一结果也反映了: 被动陆缘环境的张性断层因缺乏相伴生的褶皱而有利于水合物的发育, 并可能作为天然气的泄漏通道而破坏水合物成藏; 主动陆缘环境的断裂以挤压逆冲断层为主, 并伴生强烈的褶皱, 其中断裂是深部烃源向上运移的通道, 褶皱则是浅部天然气聚集成藏的圈闭。

关键词: 南海北部陆坡; 断裂构造; 分形; 天然气水合物; 构造环境; 沉积作用

中图分类号: P618.13; P744.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)05-0131-06

Application of Fractal to the Relations between Faults and Gas Hydrate on the Northern Continental Slope of the South China Sea

YAO Yantao, ZHAN Wenhuan

(CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Fractal dimensions of spatial fault distribution on the northern continental slope of South China Sea were calculated with box-counting method. Overlay of the dimensions with evidence and proxies of potential gas hydrate shows that the relations of faults and gas hydrate are completely different between the northern slope and the offshore area of southwestern Taiwan. Potential gas hydrate on the northern slope, a passive continental margin, seems to concentrate in the area where faults are thin, while the situation is opposite in the offshore area of southwestern Taiwan which belongs to a part of the active accretionary wedge. This result indicates that the dominating extensional faults on the passive continental margin, lacking of accompanying folds, mainly act as vents for gas leaking to the seafloor instead of efficient migration pathways for thermogenic gas to form hydrates. In contrast, the imbricate fold-and-thrust structures, commonly dominating on the active continental margin, are of benefit to the formation of gas hydrate, with thrusts acting as gas migration pathways and folds as storages.

Key words: northern continental slope of South China Sea; fault; fractal; gas hydrate; tectonic environment; sedimentation

南海北部陆坡具有形成天然气水合物的优越条件, 过去的勘探发现了大量指示天然气水合物存在的异常, 包括地貌或构造异常 (麻坑、泥火山或

底辟、滑塌体等)、地球化学异常 (甲烷含量、自生碳酸盐、热红外等) 以及地球物理异常 (BSR、振幅空白、极性反转等), 其中出现 BSR 是可以认

^{*} 收稿日期: 2008-09-28

基金项目: 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金资助项目 (MGE2007KG04); 广东省自然科学基金资助项目 (07004206); 中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金资助项目 (MSGL0711)

作者简介: 姚衍桃 (1980 年生), 女, 博士生; E-mail: yetta.yao@qq.com

为存在天然气水合物的^[1]。南海北部陆坡的地震反射剖面显示多处有BSR存在,使南海北部陆坡成为我国海洋天然气水合物调查研究的重点海域。

由于天然气水合物本身所具有的特殊性和复杂性,目前有待解决的一个重大问题就是天然气水合物的形成机制。国内外大量的研究表明水合物与断裂、底辟及泥火山等存在密切关系,于是科学家们认为海底天然气水合物的聚集成藏与烃类流体的垂向运移有关,在这个过程中断裂起了关键作用^[2]。沙志彬等^[3]认为断层与水合物的存在息息相关,断层既为水合物的形成创造良好的构造条件也对水合物的赋存起一定的破坏作用;余朝丰^[4]总结国内外文献发现,活动陆缘环境中的逆断层可能对水合物起着更为重要的作用。就南海北部陆坡的构造环境,不少学者认为区内张性断层比较发育并切穿第四纪沉积层,是促使甲烷流体向上运移至水合物稳定带的重要通道^[5-6]。总之,断裂构造对天然气水合物的形成与分布起着不可忽视的作用,研究两者之间的关系也就具有非常重要的意义。但从研究现状看,有关这方面的专门探讨并不多,在很大程度上阻碍了对天然气水合物成藏机理认识的深入。

分形几何是定量描述自然界中复杂非线性现象的强有力工具,它在断裂研究中的应用表明,断裂的空间分布具有自相似性,断裂平面分布的分维值可作为断裂发育程度的一个定量参数^[7-8]。若将其应用到南海北部陆坡断裂构造与天然气水合物关系的研究中,必然可获得一些有用信息,继而为水合物的形成机制提供新的认识或为现有的观点提供佐证。

1 南海北部陆坡断裂构造的分形特征

1.1 南海北部陆坡的断裂系统

南海是一个张裂型的边缘海,其北部陆缘属于华南地块的一部分,为被动大陆边缘。陆坡水深从300~500 m迅速增加到2000~4000 m,是陆壳向洋壳的过渡带。自晚白垩纪以来,南海经历了多期张裂运动和裂后沉降,在北部陆缘形成了一系列的断裂以及受断裂控制的凹凸相间、南北分带、东西分界的构造单元(图1)。

南海北部的断裂在走向上主要分北东向、近东西向和北西向三组,不同走向的断裂可能形成于不同期次的构造运动,并起不同的控制作用,如北东向和北东东向断裂始终伴随着南海各海盆的扩张及沉降,并控制着北部陆缘盆地的差异升降,北西向及北西西—近东西向断裂主要发育在盆地内部,把

盆地分割成多级的隆起和坳陷。在空间分布上,各组走向的断裂相互交错,构成盆地及次级构造单元的框架。将陆架与陆坡作对比,陆架上发育的断裂相当密集,陆坡上则相对要稀少,而且以上陆坡为主,下陆坡至洋盆的断裂更为稀少,这与陆架至上陆坡勘探程度高、下陆坡至洋盆勘探程度低有一定关系。

天然气水合物的稳定存在需要一定的温度和压力条件,这就决定了南海北部的天然气水合物主要在陆坡区形成,该区快速、巨厚的沉积也是水合物发育的重要条件之一,因此本文选取南海北部陆坡作为探讨断裂与天然气水合物关系的研究区。另外要特别指出的是,台西南海域陆坡区属于主动大陆边缘,受俯冲作用形成了一系列近南北向的逆冲断层,而且该海域的水合物也非常发育^[9-10],将其作为研究区的一部分使得研究区既有被动陆缘环境又有主动陆缘环境,保证了研究的全面性,同时便于两种构造环境的结果对比。

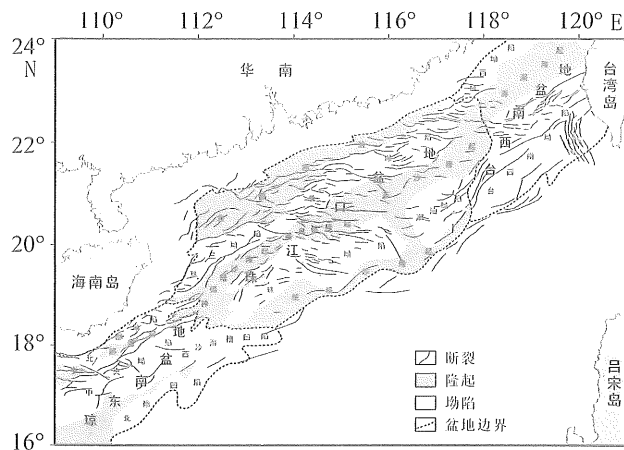


图1 南海北部区域构造图

Fig. 1 Geological map of the northern South China Sea

1.2 断裂平面分布的分维值计算

分形几何学是描述自然界中不规则现象的有效定量工具,在断裂研究中已得到较广泛的应用,断裂二维空间分布分维值的大小表征着断裂在二维平面上数量的多少、规模的大小、组合方式的复杂程度等特征。本文试图利用分形几何学来研究南海北部陆坡的断裂特征,并以此来探讨断裂与天然气水合物在二维平面上的分布关系,希望能为天然气水合物的勘探和调查提供一些有用的参考信息。

在断裂平面分布的分维值计算中,数盒子法是一种常用的方法,由这种方法计算得到的分维(D_0)叫容量维。其原理是:以边长为 r 的正方形

格子去覆盖断裂研究区,有断裂落入的格子数(即非空格子数)共 $N(r)$ 个, r 越小则 $N(r)$ 越大,若 $N(r)$ 与 r 满足幂律关系

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (C \text{ 为常数})$$

则 D 为该断裂平面分布的分维值。

根据南海北部陆坡的断裂发育情况、水合物异常和识别标志的分布及陆坡的地形地貌特征,并综合考虑计算的可行性和精度,选取 $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ 的正方形格子作为独立的计算单元,覆盖本次研究范围的共有115个单元(图2)。对于每一个格子单元,在计算过程中分别以边长40、20、10、5及2.5 km的正方形去覆盖,通过数盒子法统计出不同正方形格子覆盖下的非空格子数,作边长与非空格子数的双对数图,再用最小二乘法进行线性拟合,所得直线的斜率即为格子单元内断裂分布的分维值。以各格子单元的分维值作为其中心点的值,通过内插可获得断裂在平面上分布的分维等值线图。

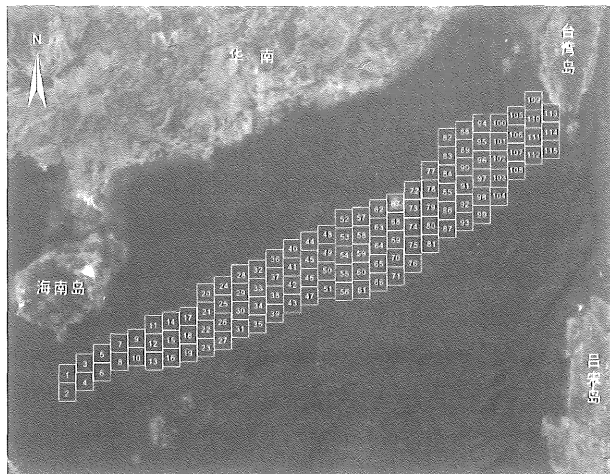


图2 $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ 的分维计算单元

Fig. 2 Cells of $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ for fractal calculation

1.3 断裂平面分布的分形特征

根据115个格子单元的统计结果,除了部分无断裂即空白的格子单元及25号单元的相关系数较低以外,其它格子单元的相关系数均大于0.9,表明这些格子单元内的断裂在2.5~40 km的无标度区间上具有显著的统计自相似性。但分维值普遍偏低,反映了南海北部陆坡的断裂构造并不是很发育。

图3是以115个格子的断裂分维值作为各格子中心点的值进行内插所得到的等值线图。从等值线的分布情况看,高分维值(≥ 1.2)主要出现在台

西南海域、番禺低隆起及琼东南盆地北部的上陆坡,是研究区内断裂构造相对比较发育的三处海域。其中,台西南附近海域由于欧亚板块向菲律宾板块俯冲而产生了大量近南北向排列的逆冲断层,使该处成为研究区内断裂分布分维值最高的海域。低分维值主要出现在西沙海槽、一统暗沙等海域,对应着南海北部断裂发育相对稀少的下陆坡。这一分形特征表明了研究区内的断裂在平面上分布的分维值是其发育程度的一个定量参数。断裂越发育,分维值就越高,反之则越小。

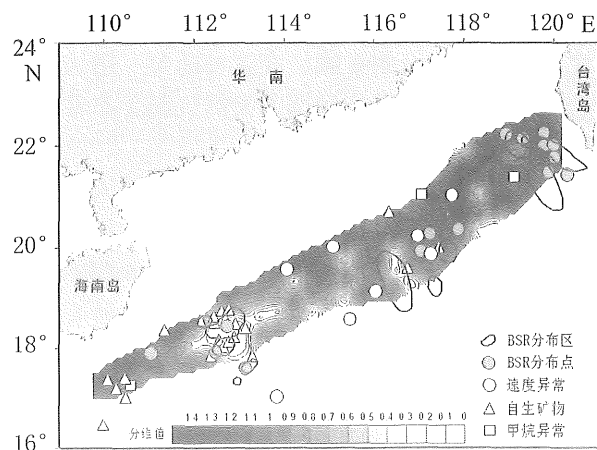


图3 南海北部陆坡断裂分维等值线与水合物识别标志分布图(水合物识别标志据文献[11-15])

Fig. 3 Distribution of fractal dimension isolines and gas hydrate proxies on the northern continental slope of the South China Sea

2 断裂与天然气水合物的关系

将上述断裂分维等值线与指示水合物可能存在的各种识别异常和标志进行叠加,结果显示北部陆坡的水合物主要分布在分维值低值区,特别是在西沙海槽,大量识别标志集中在低值区中心,表明北部陆坡的水合物主要产出于断裂欠发育的海区。在台西南海域,水合物识别标志则主要出现在分维值高值区,表明该处的水合物主要形成于断裂比较发育的海区。那么,是什么原因造成了这种截然相反的现象呢?由分析和对比,北部陆坡与台西南海域的最大差异主要在于构造环境,而不同构造环境下的断裂性质及与断裂相伴生的其他构造也不同,因此构造环境上的差异可能是造成两处海域的断裂与水合物出现截然相反的分布关系的主要原因。另外,天然气水合物烃源的不同也可能是导致这种分布差异的因素之一。

2.1 北部陆坡

在构造环境问题上,北部陆坡是随南海扩张而形成的被动大陆边缘,发育的断裂以张性或张扭性正断层为主。根据与断层有关的天然气水合物成矿模式^[3],断裂是深部含烃流体向上运移的一种良好通道,因此在这方面,断裂是天然气聚集形成水合物矿藏的有利构造。但另一方面,切穿浅部沉积层的断裂容易破坏水合物赋存的圈闭环境,而且被动陆缘环境中的张性正断层往往因缺乏相伴生的褶皱或其它挤压变形构造而不利于水合物矿藏的形成。根据大量的地震剖面,绝大多数以断裂作为烃源通道的BSR分布区都有褶皱伴生,张光学等^[16]称之为断褶型水合物矿藏。在这种断裂-褶皱构造组合中,褶皱对运移到浅部的天然气起了非常关键的圈闭作用^[3,16-17]。

在北部陆坡的天然气成因问题上,前人研究有不同的结果和说法。如浅表层沉积样品的甲烷碳同位素和轻烃类组成特征分析结果显示,北部陆坡水合物的烃源主要是深部热解成因气,同时兼有少量的生物成因气^[13,18]。但是,神狐海域沉积物较深的SMI反映了甲烷气体的垂向通量较小,其来源主要是生物甲烷^[19],而且目前南海北部陆坡只发现有生物成因的水合物^[9],全球已发现的海洋水合物也以生物成因占绝大多数^[20]。鉴于生物成因的水合物主要发育在渗透性较好的沉积层而热解成因的水合物应发育在作为烃流体垂直运移通道的断裂上部^[21],我们的研究结果即北部陆坡的水合物主要分布在断裂相对稀少的海域,可作为北部陆坡天然气水合物以生物成因为主的一个佐证。这些生物成因的烃流体一般不需要依靠断裂进行运移,常形成扩散型水合物^[22]。控制这类水合物产出的最主要因素是沉积作用,快速堆积的陆源碎屑物不仅含有丰富的有机质,其松散的特征还构成了良好的流体输导体系^[23]。在南海的构造和沉积演化过程中,中中新世以来华南大陆为北部陆坡提供了大量的富含有机质的沉积物,是该海区形成生物成因水合物的关键。

特别地,东沙群岛东南海域的水合物识别异常和标志对应着区内相对较高的分维值(1~1.2),这可能与其特殊的地质构造有关。因为东沙运动时期,这里受到弧陆碰撞及岩浆事件的影响,断层倾角较陡并具有与断裂构造相伴生的短轴背斜、同沉积背斜和底辟构造^[23],以致这里的地质环境有别于北部陆坡其它的水合物分布区。另一方面,这里的新生代沉积很薄,高热流值和高地热梯度也反映

出一种不利于天然气水合物产出的环境,因此存在的BSR可能是一种假象^[24]。由此我们推测,如果这里有天然气水合物存在,也可能以热解成因为主。

2.2 台西南海域

与北部陆坡相反,研究区内属于主动大陆边缘的台西南海域,对应着南海向菲律宾板块俯冲所形成的增生楔,其显著的构造特征是叠瓦状逆冲断层和褶皱非常发育。逆冲断层是深部烃流体向上运移的通道,褶皱则成为浅部天然气的有效圈闭,因此台西南海底增生楔的构造条件非常适合热解成因水合物的产出。在沉积条件上,台湾山脉的隆起和剥蚀为该海区带来了大量的陆缘碎屑物,这些碎屑物富含有机质,伴随着构造形变形成了很厚的沉积层,为该海域生物成因水合物的形成提供了丰富的烃源和良好的储集环境。根据上述的构造和沉积条件,台西南海域的天然水合物可能既有来自于深部的热解气也有形成于沉积层内的生物甲烷,海底沉积物的地球化学研究已经证实了这一点^[21]。增生楔部位的构造和沉积明显控制着水合物的形成与分布^[25],其中大部分底辟脊平行于褶皱和断裂的走向分布以及BSR主要分布在背斜脊部和邻近盆地^[9]应是构造控制的结果。

2.3 小结

将南海北部陆坡各种指示水合物存在的异常和标志与断裂分维等值线进行叠加,其结果显示:在被动陆缘的北部陆坡,水合物主要分布在分维值低值区,表明水合物产出于断裂欠发育的海区;在主动陆缘的台西南海域,水合物则主要集中在分维值高值区,表明水合物产出于断裂较发育的海区。由此得知,断裂越发育并非意味着天然气水合物越丰富,“断裂带发育的常规气藏周围地区将是寻找水合物矿藏的关键部位”^[26]也是值得商榷的,因为不同区域构造背景下主体断裂的构造性质有差异,对天然气水合物的形成也就起不同的作用。因此,在进一步研究和探讨断裂与水合物的关系时,首先要明确研究区的区域构造背景和主要断裂的构造性质。

但本次研究也有其局限性。首先,南海北部陆坡(特别是下陆坡)的勘探程度相对较低,揭示的断裂在数目或规模上也就相对要小,这就降低了研究结果的可靠性。其次,研究过程中被忽略的小断层可能对天然气水合物起着不可忽视的作用。再次,各种异常和标志对水合物的指示作用还有着较大的不确定性,如BSR虽然是目前天然气水合物

较为可靠、应用也最为广泛的识别标志,但水合物与BSR并非一一对应,而且地震剖面存在着多解性。这些都给断裂与天然气水合物关系的研究带来了困难。

断裂构造与天然气水合物的空间分布关系是查明断裂在天然气水合物形成和发育过程中所起作用的前提,本文利用分形几何学只在平面分布关系上进行了初步探讨,更深入和详细的研究需要从宏观到微观、从平面到三维空间甚至四维时空关系上入手。

3 结 论

分形几何学在南海北部陆坡断裂构造研究中的应用表明该区断裂在平面上的分布具有统计自相似性,断裂的发育程度可用分维值进行定量描述。将分维等值线与各种水合物识别异常和标志进行叠加,发现北部陆坡被动陆缘环境的水合物分布在断裂欠发育的海区,台西南主动陆缘环境的水合物分布在断裂较发育的海区,这种差异主要是因构造环境不同而造成的。褶皱是对天然气起重要圈闭作用的构造,北部陆坡的张性正断层因缺乏相伴生的褶皱而导致深部天然气泄漏,从而不利于热解成因水合物的形成,侧面上反映了该海域的水合物以生物成因为主,沉积作用是主要的控制因素。台西南增生楔部位的逆冲断层和褶皱十分发育,是非常有利于热解成因水合物形成的一种构造组合,另一方面,该海域的沉积条件也非常有利于生物成因水合物的产出,因此天然气水合物既有热解成因也有生物成因,水合物的形成和分布受构造和沉积共同控制。

不管在被动大陆边缘还是主动大陆边缘,断裂对天然气水合物的形成和分布都起着非常重要的作用,查明两者之间的关系将大大推动人类对天然气水合物成因机理的认识,继而为水合物的勘探和开发提供可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 宋海斌,张岭,江为为,等. 海洋天然气水合物的地球物理研究(Ⅲ):似海底反射[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 182-187.
SONG Haibin, ZHANG Ling, JIANG Weiwei, et al. Geophysical researches on marine gas hydrates (III): bottom simulating reflections [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 182-187.
- [2] MILKOV A V, SASSEN R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(1): 1-11.
- [3] 沙志彬,王宏斌,龚跃华. 断层与天然气水合物的关系[J]. 南海地质研究, 2004, 41-47.
SHA Zhibin, WANG Hongbin, GONG Yuehua. The relations between faults and gas hydrates [J]. Geological Research of South China Sea, 2004, 41-47.
- [4] 余朝丰. 断裂与天然气水合物的依存关系[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(12): 34-37.
YU Chaofeng. The dependent relation of gas hydrates on faults [J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(12): 34-37.
- [5] 王宏斌,张光学,杨木壮,等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 81-86.
WANG Hongbin, ZHANG Guangxue, YANG Muzhuang, et al. Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continent margin, the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(1): 81-86.
- [6] 孙春岩,牛滨华,文鹏飞,等. 海上E区天然气水合物地质、地震、地球化学特征综合研究与成藏远景预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1076-1085.
SUN Chunyan, NIU Binhua, WEN Pengfei, et al. An integrated study method for exploration of gas hydrate reservoirs in marine areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1076-1085.
- [7] PÉREZ-LÓPEZ R, PAREDES C, MUNOZ-MARTIN. Relationship between the fractal dimension anisotropy of the spatial faults distribution and the paleostress fields on a Variscan granitic massif (Central Spain): the F-parameter [J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 663-677.
- [8] 姚衍桃,詹文欢. 南海南部断裂的分形研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 59-66.
YAO Yantao, ZHAN Wenhuan. Fractal analysis of faults in the southern part of the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2): 59-66.
- [9] LIU Charshine, SCHNÜRLÉ Philippe, WANG Yunshuen, et al. Distribution and characters of gas hydrate offshore of southwestern Taiwan [J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2006, 17(4): 615-644.
- [10] CHI Wucheng, DONALD L R, LIU Charshine, et al. Distribution of the Bottom-Simulating Reflector in the offshore Taiwan collision zone [J]. Terr Atmos Ocean Sci, 1998, 9(4): 779-794.
- [11] 祝有海,吴必豪,卢振权. 中国近海天然气水合物找矿前景[J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 174-180.
ZHU Youhai, WU Bihao, LU Zhenquan. The prospecting for gas hydrate offshore China [J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 174-180.

- [12] 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 20-28.
YAO Bochu. The gas hydrate in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(2): 20-28.
- [13] 吴必豪, 张光学, 祝有海, 等. 中国近海天然气水合物的研究进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 177-189.
WU Bihao, ZHANG Guangxue, ZHU Youhai, et al. Progress of gas hydrate investigation in China offshore [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 177-189.
- [14] 苏新, 陈芳, 于兴河, 等. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 1-13.
SU Xin, CHEN Fang, YU Xinghe, et al. A pilot study on Miocene through Holocene sediments from the continental slope of the South China Sea in correlation with possible distribution of gas hydrates [J]. Geoscience, 2005, 19(1): 1-13.
- [15] 杨涛, 蒋少勇, 葛璐, 等. 南海北部陆坡西沙海槽XS-01 站位沉积物孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 442-448.
YANG Tao, JIANG Shaoyong, GE Lu, et al. Geochemical characteristics of sediment pore water from Site XS-01 in the Xisha Trough of South China Sea and their significance for gas hydrate occurrence [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 442-448.
- [16] 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.
ZHANG Guangxue, ZHU Youhai, LIANG Jinqiang, et al. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics [J]. Geoscience, 2006, 20(4): 605-612.
- [17] 张光学, 祝有海, 徐华宁. 非活动大陆边缘的天然气水合物及其成藏过程述评[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 181-186.
ZHANG Guangxue, ZHU Youhai, XU Huaning. Gas hydrate on the passive continental margin and its pool-formation process [J]. Geological Review, 2003, 49(2): 181-186.
- [18] 卢振权, 吴必豪, 祝有海. 南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 232-239.
LU Zhenquan, WU Bihao, ZHU Youhai. Preliminary discussion on origin and formation of potential gas hydrates in South China Sea [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(3): 232-239.
- [19] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-6.
WU Nengyou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu area, north slope of South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9): 1-6.
- [20] 龚建明, 戴春山, 蔡峰, 等. 天然气水合物的成因类型初探[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(11): 1-5.
GONG Jianming, DAI Chunshan, CAI Feng, et al. Preliminary study on the formation type of gas hydrates [J]. Marine Geology Letters, 2001, 17(11): 1-5.
- [21] OUNG Jungnan, LEE Chenying, LEE Chaoshing, et al. Geochemical study on hydrocarbon gases in seafloor sediments, southwestern offshore Taiwan-Implications in the potential occurrence of gas hydrates [J]. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 2006, 17(4): 921-931.
- [22] CHEN Duofu, Su Zheng, and CATHLES L M. Types of gas hydrates in marine environments and their thermodynamic characteristics [J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2006, 17(4): 723-737.
- [23] 吴时国, 张光学, 郭常升, 等. 东沙海区天然气水合物形成及分布的地质因素[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 7-12.
WU Shiguo, ZHANG Guangxue, GUO Changsheng, et al. Geological constraint on the distribution of gas hydrate in the Dongsha continental slope of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(4): 7-12.
- [24] YAN Pin, DENG Hui, and LIU Hailing. The geological structure and prospect of gas hydrate over the Dongsha slope, South China Sea [J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2006, 17(4): 645-658.
- [25] 邓辉, 阎贫, 刘海龄. 台湾西南海域似海底反射分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 79-85.
DENG Hui, YAN Pin, LIU Hailing. An analysis on bottom simulating reflectors in southwest Taiwan Sea area [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 79-85.
- [26] 师生宝. 天然气水合物的形成与识别[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 14-19.
SHI Shengbao. Formation and recognition of natural gas hydrate [J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(10): 14-19.