

文章编号: 0253-2697(2008)03-0324-05

南海北部陆坡大型气田区天然气水合物的 成藏地质构造特征

吴时国^{1,2} 姚根顺^{2,3} 董冬冬^{2,4} 张光学⁵ 王秀娟²

(1. 中国石油大学资源与信息学院 山东青岛 266555; 2. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071;

3. 中国石油勘探开发研究院杭州地质研究所 浙江杭州 310023; 4. 中国科学院研究生院 北京 100049;

5. 中国地质调查局广州海洋地质调查局 广东广州 510760)

摘要: 南海北部被动大陆边缘是板块活动相对较弱的地区,业已证实是巨大天然气田形成的有利场所,同时也是水合物发育的有利地区。对被动大陆边缘水合物的富集规律研究表明:热解成因天然气水合物在被动大陆边缘占有重要地位,被动陆缘的活动断裂、底辟构造、滑塌堆积、断裂坡折带和海底扇砂体对天然气水合物的富集过程具有重要的控制作用。从南海北部陆坡的研究实例看,断裂坡折带作为重要的疏导系统,有利于天然气向水合物稳定带运移,同时控制着海底扇和滑塌堆积等水合物有利成矿相带。断裂的幕式活动促进热解气体向上渗漏,并在水合物稳定带中形成水合物。在天然气田与天然气水合物的共存区域,可以形成两种类型的水合物:一种是构造渗漏型,它是以高浓度的深部热解气为主、以浅层生物气为辅的水合物;另一种是地层扩散型,这类水合物以低浓度的浅层生物气为主,以深部热解气为辅。

关键词: 南中国海;被动大陆边缘;天然气水合物;构造坡折带;水合物成藏模式

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field of the northern South China Sea

WU Shiguo^{1,2} YAO Genshun^{2,3} DONG Dongdong^{2,4} ZHANG Guangxue⁵ WANG Xiujuan²

(1. College of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Key Laboratory for Marine Geology and Environment of the Institute of Oceanology,

Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Hangzhou Institute of

Petroleum Geology, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Hangzhou 310023, China;

4. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. Guangzhou Marine Geology Survey Bureau, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The plate activity is weaker in the passive continental margin of the northern South China Sea, which is favorable for forming the large-scale gas field and gas hydrate reservoirs. The study on gas hydrate enrichment in the passive continental margin showed the importance of thermogenic gas for forming gas hydrate. The active faults, diapire structure, slump deposits, faults break and coarse submarine fan in the slope controlled the concentration of gas hydrate. The study case of the northern South China Sea showed that fault break was an important migration system and favorable for gas to transport into the stable zone of gas hydrate and also controlled the profitable sedimentary facies zones, such as submarine fan and slump deposits. Episodic activities of faults could prompt thermogenic gas to leak upwards and form gas hydrate in the stable zone of gas hydrate. In the coexisting zone of gas and gas hydrate, there were two models of gas hydrate reservoir. One model was the tectonic discharge dominated by high-concentration thermogenic gas with a little shallow biogenetic gas, and another was the strata diffusion mainly containing the low-concentration shallow biogenetic gas and a little thermogenic gas.

Key words: South China Sea; passive continental margin; gas hydrate; fault break; gas hydrate reservoir model

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-203)“南海深水油气勘探中若干问题”、国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA09Z349)和山东省“泰山学者”建设工程项目联合资助。

作者简介: 吴时国,男,1963年9月生,1984年毕业于武汉地质学院,现为中国石油大学(华东)特聘教授、中国科学院海洋研究所研究员、博士生导师,主要从事海底构造、海洋地球物理及天然气水合物研究。E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn

被动大陆边缘是指构造上长期处于相对稳定状态的张裂型大陆边缘,亦称为“大西洋型边缘或离散大陆边缘”,占地球上大陆边缘总长的49%,多沿大西洋或印度洋边缘分布,具有宽阔的陆架、较缓的陆坡和平坦的陆裙等地貌特征^[1]。在这些地区的外陆架—陆坡区(具有变薄的下沉陆壳)或陆坡—陆隆区(下沉的洋壳)边缘处,在裂陷期或裂陷后热沉降阶段发育了一系列平行于相邻大陆海岸线的离散大陆边缘盆地。在陆坡、海隆、边缘海深水盆地中的表层沉积物或沉积岩中赋存有天然气水合物,这些构造单元是天然气水合物富集成藏的理想场所。大西洋沿海域至南极大陆周边、北极海周缘的多数地区均属被动大陆边缘。典型的海区有布莱克洋脊、卡罗来纳、墨西哥湾、印度西海岸外、波弗特海、挪威西北巴伦支海及非洲西海岸外等,在上述地区发现了天然气水合物存在的地质和地球物理证据^[2-6],在布莱克海台和墨西哥湾采集到水合物样品^[7]。我国南海北部大陆边缘也属被动大陆边缘,具有丰富的天然气水合物成矿远景^[8-13]。2006年在白云凹陷LW3-1构造发现了巨型天然气田^[14]。珠江口盆地深水新生代沉积层十分发育,中新世—上新世的最大沉积厚度达2000 m以上。在该区不仅具有较高的沉积速率,而且构造活动比较强烈。在5.5 Ma前,菲律宾海板块和欧亚板块在台湾地区发生了碰撞,形成台湾岛,同时在南海北部陆缘产生NWW向左旋走滑断裂活动,促使流体沿水平方向流动,为天然气水合物的大量富集创造了良好的条件。

1 深水油气区天然气水合物的地质地球物理特征

在地震反射剖面上,似海底反射波(BSR)总体表现为一个大致平行海底的强或较强反射波,BSR通常作为水合物存在的重要依据^[5]。在南海北部,一般可以分为强振幅BSR和弱振幅BSR。其中,强振幅BSR(S-BSR)具有振幅强、连续性好、容易识别等特点,横向上可在一定范围内追踪;而弱振幅BSR(W-BSR)的振幅较弱,难以辨认。由于区内中、浅部地层产状多与海底平行,因此,大多数BSR基本与地层产状平行,仅在部分基底起伏变化地区与地层呈现明显的斜交关系。高分辨率地震资料表明:南海北部陆坡神狐地区(即珠江口盆地深水区)存在BSR,正好位于LW3-1天然气田的上方(图1),区内BSR之上的反射层存在弱振幅或振幅空白现象,水合物层厚度为10~264 m。沉积物地球化学研究结果表明:浅层沉积物的天然气大多来自深部的热解天然气^[13],该区的BSR与区内的天然气田密切相关。

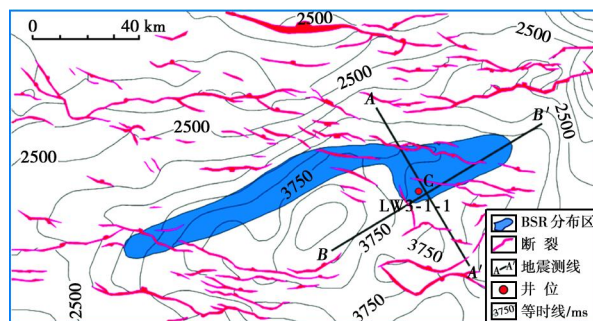


图1 LW3-1地区BSR分布及中新世底界主要断裂分布
Fig. 1 The distribution zone of bottom simulating reflector (BSR) in LW3-1 area and major faults distribution in the Miocene epoch

神狐地区的天然气水合物在地震反射剖面上通常呈现较弱的振幅或振幅空白带。一般情况下,反射振幅的强弱与水合物含量有关,空白程度与孔隙空间内胶结水合物数量有关。水合物含量越高,振幅越弱,空白程度越高;反之,若地层中仅含少量水合物,则仅表现为振幅的减弱。因此,BSR之上出现的振幅空白现象是水合物存在的又一证据,在没有明显似海底反射波(W-BSR)的地区,可作为探测水合物的重要地震指示。同时,由于振幅减弱程度与水合物含量直接相关,因此可以利用地震反射振幅信息,间接地估计水合物的含量及储量大小^[15]。在珠江口盆地深水解释的BSR中,绝大多数BSR之上的反射层均存在振幅空白带现象。

2 天然气水合物形成的地质构造特征

在南海北部陆缘,与天然气水合物分布有关的构造坡折带、海底滑塌构造、活动断裂构造等构造的形成除与陆坡地区的快速热沉降有关外,还和菲律宾海板块与欧亚板块自上新世以来在台湾地区发生碰撞这一构造事件密切相关。

2.1 构造坡折带

构造坡折带对盆地充填可容纳空间的变化和沉积作用产生重要的影响。断裂坡折带常是沉积相带和沉积厚度发生突变的地带,在断裂坡折带往往发育扇三角洲或海底扇等沉积砂体。低位域砂体发育在层序底部,并沿断裂坡折带成群分布,形成构造—岩性油气富集带。构造坡折带是不同构造单元相接的部位,这些部位一般具有地形坡降较大、沉积厚度大的特点,又靠近主力气源区,而且底部断裂相对发育。同时,构造坡折带上往往岩性较粗,储集体较发育,易于捕捉大量的天然气,从而形成具有规模效应的天然气水合物矿藏。

南海北部大陆边缘盆地演化经历了裂陷期和裂陷后热沉降期两个阶段。在裂陷期形成了大量断裂构

造,在凹陷的边缘往往发育规模较大的同生断层(图2),这些断层控制了盆地的边界和当时的古地形。这些断裂在后期继续活动,并控制了陆坡的起伏和演化,因而这样的地区被称为断裂坡折带。在这些坡折带,存在着天然气水合物富集的有利条件:断裂坡折带连接下部生烃凹陷,具有丰富的热解天然气,即具有充足的气源条件;坡折带发育有丰富的海底扇浊积砂体和滑塌堆积体,为天然气水合物形成提供了良好的储层条件,目前白云凹陷LW3-1-1钻井结果证实,该区发育了海底扇沉积,形成了亿吨级大气田;该区存在异常超压,气体可以随超压孔隙流体沿断层发生运移,有利于水合物稳定带的形成;坡折带的海底地形崎岖,沿坡折带形成的水下扇和海底扇砂体也可作为天然气侧向运移的良好通道(图2)。

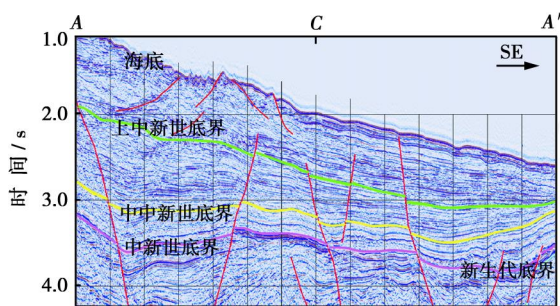


图2 南海北部断裂坡折带及其沉积体系

Fig. 2 Fault break and sedimentary system in the northern margin of South China Sea

2.2 滑塌构造

南海北部陆坡盆地发育滑塌构造,形成崎岖海底地形(图3)。滑塌体内的沉积物比较松散,孔隙度较大,有利于水合物成藏。滑塌体沿底部的滑塌面滑动,与这种构造相关的断层向上一直通至海底,但是都收敛于滑塌面而未向下错断。滑塌构造的特征表明,滑塌体内的物质相对是脆性的,而下部物质为塑性的。与其他构造稳定区相比较发现,滑塌构造内的BSR振幅较弱,表明该构造内的水合物带之下只有很少的游离气存在,气体可能已经沿断层逸散到海底。

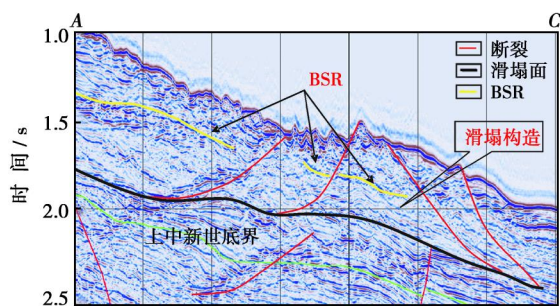


图3 海底滑塌构造与BSR

Fig. 3 Seafloor slump structure and BSR

大,有利于水合物成藏。滑塌体沿底部的滑塌面滑动,与这种构造相关的断层向上一直通至海底,但是都收敛于滑塌面而未向下错断。滑塌构造的特征表明,滑塌体内的物质相对是脆性的,而下部物质为塑性的。与其他构造稳定区相比较发现,滑塌构造内的BSR振幅较弱,表明该构造内的水合物带之下只有很少的游离气存在,气体可能已经沿断层逸散到海底。

2.3 活动断裂构造

世界上大多数水合物发育区具有较强烈的构造活动,断裂和底辟构造十分发育。Borowski^[16]在分析布莱克海台的水合物成藏时,认为活动断裂构造是水合物形成的最重要因素之一。在俯冲增生楔构造环境,活动断裂构造分布、方位变化控制着水合物的分布和含量^[17]。尽管南海北部陆坡处在被动陆缘地区相对稳定区,具备水合物形成的适宜温压条件,但活动断裂构造与水合物分布关系十分密切。图4是穿过LW3-1气田的地震剖面,在上新世以来的地层中发育一系列断层,这些断裂在平面上大多呈NW向分布,剖面上显示其活动性很强,有些可断至海底,说明在第四纪仍在活动(图1)。该区由于重力滑塌或崎岖海底的地震成像问题,BSR特征难于识别(图4)。

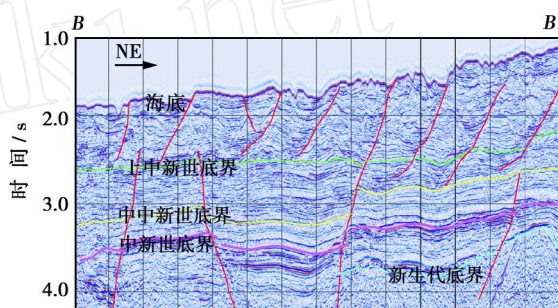


图4 水合物有利地区新近纪活动断裂构造

Fig. 4 The Neogene faults in favorable gas hydrate area

3 水合物成藏模式

充足的气源是水合物富集的必要条件,控制水合物形成有3个重要参数:沉积物中有机碳总量、生物甲烷的生产效率和孔隙流体中甲烷溶解度。在被动大陆边缘盆地发育有丰富的烃源岩和优质的储层,是深水油气的重要聚集区。这些油气向上泄漏,有利于在水合物稳定带形成水合物,通常热成因气是水合物形成的重要来源^[13]。

但生物成因气也是水合物形成的一种重要气源,特别是对于半深海环境,其浊积岩和沉积物中有一定浓度的有机碳。若转换率较高,则会有一定量的有机碳形成甲烷,并随海底深度的增加,甲烷溶解度逐渐增大。当其数量超过孔隙水中的甲烷饱和度时,生物成因气就可形成大量的水合物(约占总沉积物的2.5%),但不足以形成于BSR之上所能观察到的高速尖脉冲地震响应。一般认为,这种类型的浅层生物成因气易形成低浓度的地层扩散型水合物^[18]。

水合物赋存聚集机制的影响因素很多,如沉积速

率、气体运移方式等。南海北部在上新世—更新世—全新世以来具有较高的沉积速率。据 ODP184 航次钻井资料,位于东沙群岛东南海域的 1144 井揭示 1 Ma 以来的沉积速率为 400 ~ 1 200 m/Ma。由于沉积物在海底连续快速沉积,随着沉积荷载的增加,就会形成超压高孔隙沉积,这种沉积条件有利于形成水合物赋存所需的沉积异常体^[12]。

对被动陆缘而言,海台区水合物形成模式有两种:一种是以深部热成因气垂向迁移为主;另一种则是深海平原生物气横向迁移和深部热解气的垂向迁移的复

合成因。前者更易形成水合物富集(图 5)。被动陆缘深水区域具有“下断上拗”的双层结构,下部的裂陷盆地由于埋藏较深具有良好的生气潜力,易在断陷盆地或深水扇中形成大型气田。这些气体以断裂为主要运移通道向上运移至新生代沉积盆地浅部,然后与新生界沉积物中低成熟烃类混合,在适宜的温压域内可以形成水合物(图 5)。断裂构成了气体的垂向运移通道,不整合面与海底扇砂体构成气体的侧向运移通道。另外,深源高成熟气体也可以随超压孔隙流体向上运移,与浅部生物成因气混合成藏。

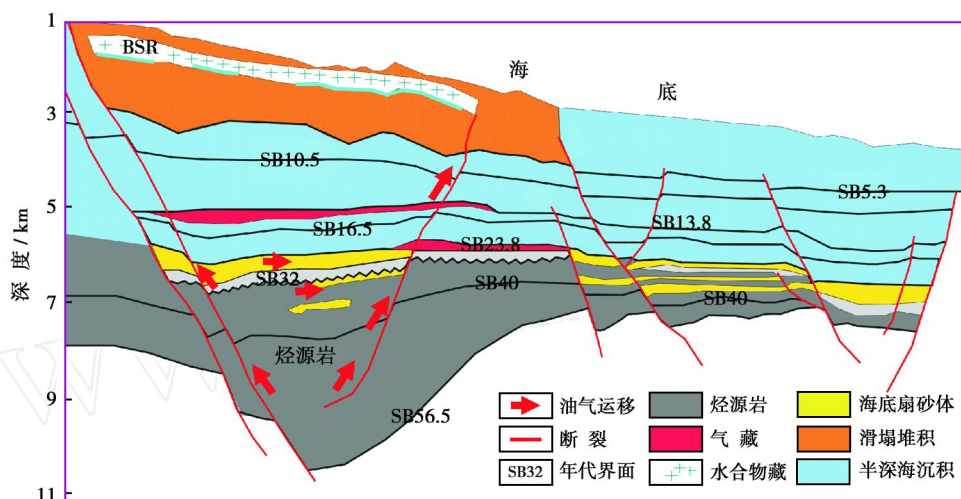


图 5 南海北部陆坡天然气—天然气水合物成藏模式

Fig. 5 Reservoir model for gas-gas hydrate in the northern South China Sea

南海北部神狐海区广泛分布着 NWW 向左旋走滑断裂(图 1)。这种 NWW 向左旋走滑活动导致南海北部陆缘的流体沿 NWW 向走滑断裂流动,随流体活动的浅层生物气体在某些位置富集,在合适的温压条件下,形成富集的天然气水合物。因此,在神狐海域可形成两种类型的水合物:构造渗漏型,是以高浓度的深部热解气为主、浅层生物气为辅的水合物;地层扩散型,这类水合物以低浓度的浅层生物气为主,以深部热解气为辅。

4 结 论

构造坡折带沉积较厚,又靠近主力气源区,而且底部断裂相对发育,具有较好的气体运移条件。同时,坡折带发育较粗的岩性体,适宜作为储层,易于捕捉大量的天然气,从而形成具有规模效应的天然气水合物矿藏。南海北部陆缘 NWW 向左旋走滑活动促使流体(包括天然气)沿水平方向向水合物稳定带运移,也有利于天然气水合物的形成。海底活动构造能使构造侧翼或顶部的沉积层倾斜,便于流体排放形成水合物。

海底扇浊积砂体及海底滑塌体是沉积物快速堆积而成,一般都具有较高的孔隙度,为天然气水合物的形成提供所需储集空间。滑塌沉积物由于分选性差、渗透率低,不利于气体疏导,能较好地屏蔽压力,可为天然气水合物的形成提供良好的压力环境。在一定的温度和压力条件下,甲烷和水结合就可转化为水合物。南海北部上新世以来具有较高的沉积速率,由于沉积物的快速沉降,在浅层沉积物中堆积的有机质碎屑物被迅速埋藏在海底,从而未遭受氧化而得以保存下来,并经细菌作用转变为大量的甲烷。对南海北部神狐海域天然气水合物成藏地质特征的综合分析表明,该区可能存在两种类型的水合物成藏模式:一种是以深部热解气为主的构造渗漏型;另一种是以浅层生物气为主的地层扩散型。

参 考 文 献

- [1] 吴时国,喻普之.海底构造学导论[M].北京:科学出版社,2006:106-133.
Wu Shiguo, Yu Puzhi. Introduction to seafloor tectonics [M]. Beijing: Science Press, 2006:106-133.

- [2] Andreassen K, Hart P E, Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100 (B7): 12 659-12 674.
- [3] Dillon W P, Danforth W W, Hutchinson D R, et al. Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the southeastern United States[M] Henriot J P, Mienert J. Gas hydrates-relevance to world margin stability and climate change. London: Geological Society of London, Special Publication 137, 1998: 293-302.
- [4] Hovland M, Gallagher J W, Clennell M B, et al. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: Example from the Niger Delta front[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14 (3): 245-255.
- [5] Hyndman R D, Spence G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97 (B5): 6683-6698.
- [6] Maslin M, Mikkelsen N, Vilela C, et al. Sea-level and gas-hydrate-controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan[J]. Geology, 1998, 26 (12): 1107-1110.
- [7] Sassen R, Sweet S T, Milkov A V, et al. Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope[J]. Trans. Gulf Coast Assoc. Geol., 1999, 49: 462-468.
- [8] 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.
- [9] Wu S, Zhang G, Huang Y, et al. Gas hydrate occurrence on the continental slope of the northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22 (3): 403-412.
- [10] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 4: 11-17.
Yao Bochu. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 4: 11-17.
- [11] 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.
- [12] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物成矿远景研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (1): 75-81.
Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22 (1): 75-81.
- [13] 祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. 石油学报, 2001, 22 (5): 6-10.
Zhu Youhai, Zhang Guangxue, Lu Zhenquan, et al. Gas hydrate in the South China Sea: Background and indicators[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22 (5): 6-10.
- [14] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28 (2): 15-21.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area: The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28 (2): 15-21.
- [15] Lee M W, Hutchinson D R, Dillon W P, et al. Method of estimating the amount of in situ gas hydrates in deep marine sediments[J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10 (5): 493-506.
- [16] Borowski W S. A review of methane and gas hydrates in the dynamic stratified system of the Blake Ridge region, offshore southeastern North America[J]. Chemical Geology, 2004, 205 (3/4): 311-346.
- [17] Weinberger J L, Brown K M. Fracture networks and hydrate distribution at Hydrate Ridge, Oregon[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245 (1/2): 123-136.
- [18] Trehu A M, Rupel C, Holland M, et al. Gas hydrate in marine sediments[J]. Oceanography, 2006, 19 (4): 124-142.

(收稿日期 2007-07-18 改回日期 2007-08-22 编辑 熊 英)

重 要 通 知

为了缩短出版周期,《石油学报》从 2008 年 1 月 1 日开始,全面实行网上投稿。

网上投稿方法:请登录网站 www.syx-b-cps.com.cn (外网) 或 syxb.cnpc.com.cn (内网),点击“作者投稿”,按照要求进行注册,然后根据提示即可完成投稿操作。以后您可以凭自己的用户名、密码随时在线查询稿件处理情况。衷心感谢您对《石油学报》编辑部工作的支持!

《石油学报》编辑部