

文章编号: 1001-6112(2011)06-0602-05

南海“神狐型”BSR 特征及影响因素

龚建明^{1,2}, 何玉华^{1,2}, 闫桂京^{1,2}, 杨传胜^{1,2}, 李刚^{1,2}, 苑春芳³

(1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071;

2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071; 3. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要:为了深入探讨神狐海域 BSR 特征及其影响因素,对天然气水合物钻探区高分辨率地震资料进行了精细解释。结果表明,神狐海域天然气水合物与 BSR 具有较好的对应关系,研究区 BSR 总体表现出多轴(或不光滑)和连续性较差的特征;BSR 振幅强度主要与水合物稳定带之下的游离气有关。结合世界典型水合物发现区 BSR 特征分析认为,“神狐型”BSR 的形成可能主要与不同成因水合物在纵向上的相互叠置有关。

关键词:影响因素;BSR 特征;神狐海域;南海

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Features and controlling factors of BSR in Shenhu area, South China Sea

Gong Jianming^{1,2}, He Yuhua^{1,2}, Yan Guijing^{1,2}, Yang Chuansheng^{1,2}, Li Gang^{1,2}, Yuan Chunfang³

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, China;

3. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The high-resolution seismic reflection profiles from gas hydrate drilling zones of Shenhu area in South China Sea were interpreted precisely so as to analyze the features and the controlling factors of BSR (Bottom Simulating Reflector). It has been concluded that gas hydrate and BSR are closely related. In the study area, BSR is characterized by multi-axes and is discontinuous. The amplitude of BSR is mainly controlled by the free gas underneath the base of gas hydrate stable zone. BSR in Shenhu area might be influenced by the vertical combination of gas hydrates of different origins.

Key words: controlling factor; BSR feature; Shenhu area; South China Sea

神狐海域天然气水合物钻探区位于南海北部陆坡的中段,经历了与南海北部陆缘相似的地史演化过程,沉积地层以海相沉积为主。该区滑塌作用造成海底地形起伏大、浅部地层褶皱和断裂多,部分断层延伸至海底,有利于天然气运移到水合物稳定带中。同时,从神狐水合物钻探区及周边海域岩石地球化学分析资料可知,研究区生物成因气和热解成因气都非常发育^[1],这为天然气水合物的形成提供了雄厚的物质基础。

虽然天然气水合物与 BSR (Bottom Simulating Reflector, 似海底反射)并不具有一一对应的关系,但是 BSR 仍然是目前识别海洋天然气水合物最有效的地球物理标志^[2-4]。为了探讨南海神狐海域地震剖面上 BSR 的形成原因及其影响因素,笔者对比分析了神狐海域和世界水合物发现区

的 BSR 特征,以找出其区别。从过 ODP164 航次 995 和 997 站位的地震剖面(图 1)^[5]来看,布莱克海台海底地形平坦,构造简单,地层成层性好,BSR 特征明显,表现为单轴(或光滑)、强反射及连续性好的特征,其上空白带厚而明显。水合物海岭地区 BSR 特征与布莱克海台近似,稍有不同之处在于 BSR 的连续性不如布莱克海台^[6]。相反,墨西哥湾缺少 BSR,或 BSR 特征不明显^[7]。神狐海域海底地形变化大,构造复杂,BSR 特征较明显,但其反射特征有别于布莱克海台和水合物海岭,表现为多轴(或不光滑)和连续性差的特征(图 2),为此,本文称之为“神狐型”BSR。

为了探究“神狐型”BSR 的形成原因及其影响因素,本文将从 BSR 的振幅强度、连续性以及沉积物岩性(或密度)、孔隙度、水合物层厚度、稳定带之

收稿日期: 2011-02-14; 修订日期: 2011-09-19。

作者简介: 龚建明(1964—),男,博士,研究员,从事海洋油气与天然气水合物研究。E-mail: gongjianm@yahoo.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40706024)和国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室项目(MRE200805)资助。

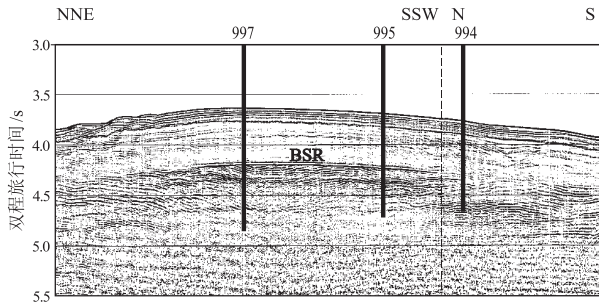


图 1 过布莱克海台的 ODP164 航次 3 个站位地震剖面^[5]
BSR 表现为单轴(或光滑)、强反射、连续性好,其上空白带厚而明显。
Fig. 1 Seismic profile across sites 994, 995 and 997,
Blake Ridge drilled during ODP Leg 164

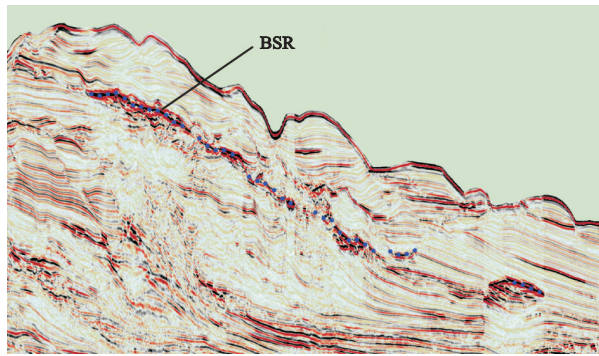


图 2 过南海神狐海域 A 站位的地震剖面
BSR 表现为多轴(或不光滑)且连续性差,
其上空白带不明显。
Fig. 2 Seismic profile across site A,
Shenhu area of South China Sea

下的游离气以及水合物成因类型等方面进行讨论分析。

1 神狐海域 BSR 特征

神狐海域水合物钻探区高分辨地震资料精细解释结果显示,在钻获水合物实物样品的地震剖面上 BSR 特征明显(图 3a),而在没有钻获水合物的地震剖面上 BSR 特征不明显或不具 BSR 特征(图 3b)。

从图 3a 中可以清楚看出,BSR 的振幅强、连续性好、与海底反射极性相反,BSR 之上的空白带明确;而在未钻遇水合物样品的图 3b 中则不具备 BSR 反射特征。由此可见,神狐海域水合物的存在与 BSR 具有较好的相关性。

与此同时,该区与世界上大多数地区的 BSR 特征又有所不同,主要表现为多轴(或不光滑)和不连续,与海底的平行性差^[8]。图 2 是过神狐海域 A 站位的地震剖面,图中解释出了几段不连续的 BSR,距海底 210~320 ms。横向对比发现,BSR 上方空白带不明显。

布莱克海台水合物分布面积大于 30 000 km²,水合物层距海底深度 190~450 m,厚度约 260 m,BSR 反射特征表现为单轴而连续(图 1)^[5]。在水合物海岭,水合物稳定带厚度 160~250 m,水合物层厚度 70~150 m,BSR 反射特征为单轴而断续^[9]。以上 2 个地区,水合物岩心地球化学分析结果均显示为生物成因(表 1)^[5,9]。相比之下,神狐海域水合物层厚度太薄,最大厚度不到 40 m,最薄的仅有 10 m,分别是水合物海岭水合物层厚度的 1/5~1/7,布莱克海台水合物层厚度的 1/10,这也许是神狐海域 BSR 不光滑和不连续的原因之一。另外,国外水合物发现区构造简单,而神狐海域水合物发现区构造复杂,这也许是神狐海域 BSR 不光滑和不连续的另外一个原因。

2 神狐海域 BSR 影响因素

“神狐型”BSR 特征除了受该区水合物层的厚度和复杂的海底地形影响以外,其主要影响因素可能有以下几个方面:岩性(或密度、孔隙度)、稳定带之下的游离气以及天然气水合物的成因类型。

2.1 岩性(或密度)对 BSR 强度的影响

BSR 强度与稳定带基底上下地层之间的波阻

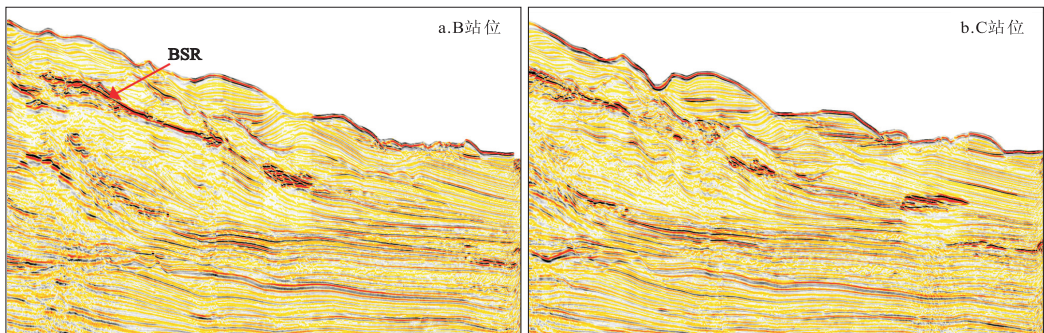


图 3 南海神狐海域发现和未发现水合物的地震剖面对比
B 站位钻遇水合物,C 站位未钻遇水合物。

Fig. 3 Seismic profiles with and without gas hydrate, Shenhu area of South China Sea

表 1 神狐海域与国外水合物发现区 BSR 特征对比^[5,9]

Table 1 Comparison of BSR features among gas hydrate areas such as Blake Ridge, Hydrate Ridge and Shenhu area

地区	水深/m	稳定带厚度/m	水合物层厚度/m	水合物层地震反射特征	水合物成因	BSR 特征
布莱克海台	3 000	450	260	空白杂乱	生物成因	单轴连续
水合物海岭	787~1 260	160~250	70~150	空白杂乱	生物成因	单轴断续
神狐海域	980~1 680	120~350	10~33.5	BSR 附近强反射	可能为混合成因	不光滑, 不连续

抗差密切相关,而波阻抗差除了与沉积层中充填的流体(包括气体)有关以外,还与沉积层的岩性(或密度)有关,而孔隙度主要影响沉积层的密度。

2007 年,神狐海域获得了 8 口水合物钻井的测井曲线,其中,沉积物岩性可以通过自然伽马测井曲线来判断。通过对 8 口水合物钻井自然伽马测井曲线的分析可以看出,除了含水合物层和可能存在游离气的层段外,工区内自然伽马值在 40~65 API 之间变化,放射性含量较高,沉积物岩性以粘土为主。3 口水合物钻井在水合物层段的自然伽马值在 25~70 API 之间变化,其中,A 站位所在的水合物层段自然伽马测井值相对较低,在 25 API 左右,粒径相对较粗,为粉砂级。结合岩心分析认为,神狐海域水合物钻探区水合物稳定带之上的沉积物主要由粘土组成,岩性变化很小。

理论上,I 型天然气水合物密度为 0.91 g/cm³,其值接近或稍低于冰的密度。因此,在同样岩性条件下,含天然气水合物层段的沉积物密度测井响应理论值较富含孔隙水的沉积物密度测井响应值要略低。从神狐海域水合物密度测井曲线来看,含天然气水合物层段的密度测井值比上下层段密度值偏低。在不含水合物的沉积物层段,密度测井值与自然伽马测井值分段特征基本一致。总体来说,神狐水合物钻探区水合物层段的密度测井值略微偏低,但表现不明显。

岩性相同,孔隙度不同,其单位体积的密度也不相同。图 4 为长源距中子测井值分布图(含水合物和可能存在游离气的层段除外)。将 8 口井对应深度的长源距中子测井数值投到图中,不同的井用不同颜色来区分。每口井对应的纵坐标数值反应了长源距中子测井数值的分布范围。从图 4 可以看出,中子测井数据分布较窄,反映海底表层沉积物孔隙度变化很小,可以初步断定水合物稳定带内在没有受到水合物和游离气的侵入和改造时,沉积物孔隙度变化较小。

综合分析认为,神狐海域水合物钻探区稳定带基底上下地层的岩性、密度以及孔隙度变化不大,

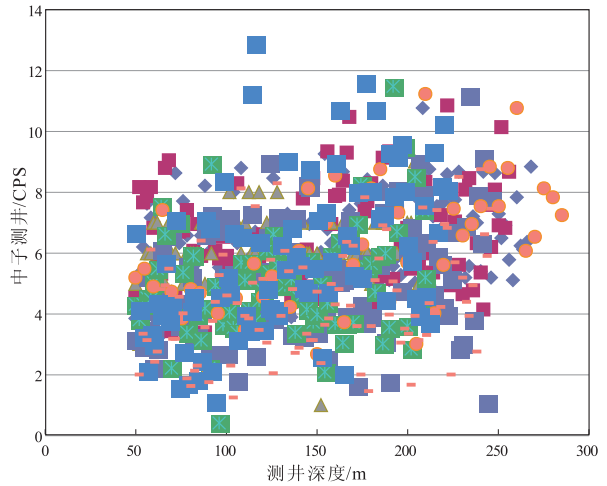


图 4 神狐海域 8 口水合物钻井的长源距中子测井值分布
Fig. 4 Distribution of long-spaced neutron values from 8 drilling wells in Shenhu area of South China Sea

它们对该区 BSR 的形成及其强度影响有限。

2.2 游离气对 BSR 振幅的影响

在神狐海域 3 口钻获水合物的探井中,B 站位水合物层厚度和饱和度比其他 2 个站位小近 50%,但是在过 B 站位的地震剖面上,BSR 却具有最强的振幅和最好的连续性(图 3a)。由于该区海底浅表层沉积物的岩性、密度以及孔隙度等因素对 BSR 的形成及其强度影响不大,因此,B 站位的 BSR 特征很可能是稳定带之下薄层游离气所致。

是否存在游离气,可以通过测井曲线中的速度、电阻率和自然伽马等综合分析来判断。事实上,在 B 站位的测井曲线中,在采集到水合物实物样品的地层之下确实存在一个速度低、电阻率高和自然伽马低的薄层,综合解释认为该段地层可能存在一定量的游离气。另外,从游离气饱和度与 BSR 振幅模拟结果来看,水合物稳定带之下只要存在游离气,即使饱和度很低也会使 BSR 振幅大大增加(表 2)^[10]。

据前人研究,水合物层厚度与 BSR 振幅具有如下关系(表 3)^[11-12],即:水合物层厚度为 37.5 m 时,振幅达到最大;小于 37.5 m 时,BSR 振幅随水合物层厚度减薄而变弱;小于 2 m 时,常规地震剖面上 BSR

表 2 游离气饱和度与 BSR 振幅的关系^[10]

Table 2 Relationship between free gas concentration and BSR amplitude

游离气饱和度/%	BSR 振幅
0~1	随饱和度增加,BSR 振幅上升,但总体较弱
1~5	随饱和度增加,BSR 振幅上升,形成明显的 BSR 反射
5~20	随饱和度增加,BSR 振幅上升,不仅有明显的 BSR 反射,还能形成明显的游离气沉积层底界面反射振幅
>20	游离气饱和度的变化对 BSR 振幅几乎没有影响

表 3 水合物层厚度与 BSR 振幅的关系^[11-12]

Table 3 Relationship between gas hydrate thickness and BSR amplitude

水合物层厚度/m	BSR 振幅	备注
>37.5	与水合物层、游离气层厚度无关,与它们的孔隙度和饱和度有关	假设水合物层速度为 1 960 m/s,地震波主频为 30 Hz,地震波的波长为 65 m。
=37.5	振幅最大	
18.8~37.5	随水合物层厚度减少而增加	
<18.8	随水合物层厚度减小而减小	
<2	在常规地震剖面上无显示	

将无法分辨。

根据测井解释结果,神狐海域水合物层厚度总体较薄,其中,A 站位和 C 站位为 20~37.5 m,B 站位小于 18.8 m。根据上述水合物层厚度与 BSR 振幅之关系,B 站位的 BSR 强度理论上应该比 A 站位和 C 站位要弱,然而,事实上 B 站位的 BSR 强度是 3 个站位中最强的。因此,在以薄层水合物分布为特征的神狐海域,水合物稳定带之下的游离气对 BSR 强度的影响比水合物层厚度的影响大得多。

2.3 不同成因水合物对 BSR 的影响

墨西哥湾是世界上生物成因和热解成因水合物同时存在的典型地区。据研究^[13],热解成因水合物的稳定带底界通常位于生物成因水合物稳定带底界之下。同时,随着水深的增加,稳定带底界深度变大,热解成因和生物成因水合物的 BSR 深度差变小,直至难以识别^[14]。

神狐海域水合物岩心地球化学分析结果显示,气体成分主要为 CH₄,含量在 96.10%~99.82%,说明该区天然气水合物主要为生物成因^[1]。但是,从神狐水合物钻探区周边海域油气钻井的天然气地球化学特征与成因类型来看,该区天然气主要为成熟—高成熟的热解成因气。更为重要的是,在距

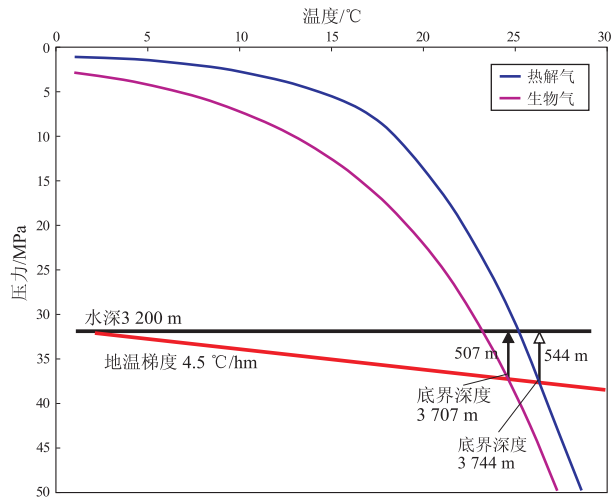


图 5 南海 LW3-1-1 井不同成因水合物稳定带底界深度和厚度推测^[16]

Fig. 5 Calculated base buried depth and thickness of gas hydrate stable zone of different origins, well LW3-1-1, South China Sea

离神狐水合物钻探目标区大约 20 km 处已发现资源量在 10×10¹⁰ m³ 的 LW3-1-1 大气田,推测神狐海域具有热解成因水合物的形成条件^[15]。另据热解成因和生物成因水合物的相平衡曲线^[16],LW3-1-1 井不同成因水合物稳定带厚度分别为 544 和 507 m,即,不同成因水合物稳定带底界 BSR 深度相差 37 m(图 5)^[16]。由于不同成因水合物的 BSR 在纵向上相差较小,因而,BSR 在剖面上不清楚,或不连续。

3 结论

1)通过对神狐海域天然气水合物钻探区高分辨率地震资料 BSR 的振幅、连续性及其影响因素的分析发现,神狐海域水合物的分布与 BSR 具有较好的相关性。但是,和世界典型水合物发现区相比,神狐海域水合物层厚度较薄,构造较复杂,这也许是神狐海域 BSR 不光滑和不连续的原因之一。

2)研究表明,神狐海域水合物钻探区浅表层沉积物的岩性、密度以及孔隙度变化不大,它们对“神狐型”BSR 的振幅和连续性影响不大。相反,水合物层厚度和稳定带基底之下的游离气是影响“神狐型”BSR 振幅和连续性的主要因素。鉴于神狐海域水合物钻探区水合物层厚度较薄,它对 BSR 振幅强度的影响不及游离气,因此,水合物稳定带基底之下的游离气是影响神狐 BSR 振幅强度的主控因素。

3)神狐海域与墨西哥湾具有相似的水合物成因类型,因此,“神狐型”BSR 的形成可能主要与不

同成因水合物在纵向上的相互叠置有关。

致谢:广州海洋地质调查局海洋矿产地质调查所郭依群、龚跃华研究员等与笔者就“神狐型”BSR 特征进行过多次探讨,对本研究提出了很好的建议,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 崔洁,何家雄,周永章,等.珠江口盆地白云凹陷天然气成因及油气资源潜力分析[J].天然气地球科学,2009,20(1):125-130.

[2] 沙志彬,杨木壮,梁金强,等. BSR 的反射波特征及其对天然气水合物识别的应用[J].南海地质研究,2003;55-61.

[3] 雷怀彦,郑艳红,吴保祥.天然气水合物勘探方法:BSR 适应性探析[J].海洋石油,2002(4):1-8.

[4] 张明,伍忠良.天然气水合物 BSR 的识别与地震勘探频率[J].海洋学报,2004,26(4):80-88.

[5] Matsumoto R, Paull C, Wallace P. Gas hydrate sampling on the Blake Ridge and Carolina Rise[R]//ODP Leg 164 Preliminary Report. Texas:ODP,1996.

[6] 龚建明,曹志敏,陈建文,等.天然气水合物发现区沉积物生气量的模拟实验[J].中国科学(D辑):地球科学,2009,39(2):204-211.

[7] Lorenson T D, Claypool G E, Dougherty J A. Natural gas geochemistry of sediments drilled on the 2005 Gulf of Mexico JIP cruise[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(9): 873-883.

[8] 吴能友,张海启,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.

[9] Tréhu A M, Bohrmann G, Rack F R, et al. Drilling gas hydrates on Hydrate Ridge, Cascadia continental margin[R]//ODP Leg 204 Preliminary Report. Texas:ODP,2003.

[10] 吴志强,陈建文,龚建明,等.海域天然气水合物的 BSR 成因[J].海洋地质动态,2004,20(6):25-30.

[11] Shiply T H. Seismic evidence for wide spread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises[J]. American Association of Petroleum Geological Bulletin, 1979, 63(12):2204-2213.

[12] Kvenvolden K A, McDonald T J. Gas hydrate of the Middle America Trench, Deep sea drilling project leg 84[R]//von Huene R, Aubouin J, eds. Initial Reports of Deep Sea Drilling Project. Washington DC: U. S. Government Printing Office, 1985: 667-682.

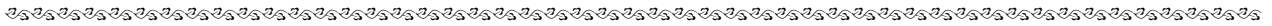
[13] Milkov A V, Sassen R. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(9):981-991.

[14] 龚建明,李惠君,张莉,等.水深对海域天然气水合物双 BSR 的控制作用[J].海洋地质动态,2010,26(7):7-11.

[15] 龚建明,胡学平,王文娟,等.南海神狐海域 X 区块天然气水合物的控制因素[J].现代地质,2009,23(6):1131-1137.

[16] 龚建明,杨艳秋,闫桂京,等.南海神狐海域热解成因与天然气水合物稳定带底界[J].中国矿业大学学报,2010,39(6):870-875.

(编辑 韩 或)



(上接第 601 页)

[16] 金之钧,朱东亚,胡文瑄,等.塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J].地质学报,2006,80(2):245-253.

[17] 吕修祥,杨宁,解启来,等.塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J].石油与天然气地质,2005,26(3):284-289,296.

[18] 朱东亚,金之钧,胡文瑄,等.塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层的影响[J].地质论评,2008,54(3):348-354.

[19] 朱东亚,金之钧,胡文瑄.塔中地区热液改造白云岩储层[J].石油学报,2009,30(5):698-704.

[20] Zhu Dongya, Jin Zhujun, Hu Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2010, 53(3):368-381.

[21] 陈代钊.构造—热液白云岩化作用与白云岩储层[J].石油与天然气地质,2008,29(5):614-622.

[22] 陈汉林,贾承造.塔里木盆地地质热事件研究[J].科学通

报,1997,42(10):1096-1099.

[23] 贾承造,魏齐国,姚慧君.盆地构造演化和区域构造地质[M].北京:石油工业出版社,1995.

[24] 贾承造.中国塔里木盆地构造特征与油气[M].北京:石油工业出版社,1997:37.

[25] 李曰俊,苏文,杨树春,等.塔中—巴楚地区断裂系统、火成岩及其对油气的控制作用[R].乌鲁木齐:中国石化西部新区勘探指挥部,2005:46-61.

[26] 张仲培,郑孟林,周波,等.塔里木盆地巴楚地区勘探潜力与目标评价[R].北京:中国石化股份有限公司,2008:23-35.

[27] 赵锡奎,何建军,张小兵,等.阿克库勒凸起构造演化与古构造研究[R].乌鲁木齐:中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,2009:33-41.

[28] 张仲培,郑孟林,周波,等.塔里木盆地巴楚地区勘探潜力与目标评价[R].北京:中国石化股份有限公司,2008:23-35.

[29] 李曰俊,吴根耀,孟庆龙,等.塔里木西部地区古生代断裂活动的方式和机制[J].地质科学,2008,43(4):727-745.

(编辑 徐文明)