

非活动大陆边缘的天然气水合物及其成藏过程述评

张光学¹⁾ 祝有海²⁾ 徐华宁¹⁾

1) 国土资源部广州海洋地质调查局, 510760; 2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

内容提要 非活动陆缘是板块活动相对较弱的地区, 也是水合物发育的有利地区。通过对世界各地非活动陆缘地区水合物富集情况的系统分析, 发现断褶组合构造、底辟构造以及“麻坑”地貌(Pockmark)与水合物的关系密切。尽管模拟海底反射层(Bottom Simulating Reflector, 简称BSR, 下同)是最重要的水合物识别标志, 但水合物与BSR之间并不存在严格的一一对应关系。非活动陆缘具有丰富的烃类物质来源和适宜的温压条件, 而断裂—褶皱组合构造、垒堑式构造和底辟构造等则为烃类气体的运移、富集和成藏提供了有利的构造环境, 便于最终形成水合物。非活动陆缘的深水区往往发育有多期叠合盆地, 因其物源、温压、构造和沉积条件的内在关联性, 常常形成深部石油、中部天然气、浅部水合物的“三位一体”烃类能源结构模式。

关键词 非活动大陆边缘 天然气水合物 BSR 成藏过程

非活动大陆边缘是指构造上长期处于相对稳定状态的大陆边缘, 亦称为“被动边缘、稳定边缘、拖曳边缘、拉伸边缘、大西洋型边缘或离散大陆边缘”(杨子廉, 2000)。非活动大陆边缘具有宽阔的陆架、较缓的陆坡和平坦的陆裙等地貌单元, 通常围绕大西洋和印度洋分布, 占目前大陆边缘的60%, 多沿劳亚古陆和冈瓦纳大陆裂谷内侧或克拉通内部形成。在这些地区的下陆架—陆坡区(变薄的下沉陆壳)或陆坡—陆隆区(变薄的下沉洋壳)边缘处, 以重力驱动的拉伸构造作用发育了一系列平行于海岸线的离散大陆边缘盆地。在这类大陆边缘的陆坡、岛坡、海山、内陆海、边缘海盆地和海底扩张盆地等的表层沉积物或沉积岩中赋存有天然气水合物, 是天然气水合物富集成藏的理想场所。

1 非活动大陆边缘天然气水合物的分布特征

非活动大陆边缘地区构造活动相对较弱, 但大洋钻探及其他方面的综合研究发现, 由于泥火山活动及张裂—转换作用, 在不同大洋的被动边缘, 或同一大洋不同地区的被动边缘, 因为海底重力流、断裂及底辟作用, 特别是陆缘内侧厚层沉积物的塑性流动、陆缘外侧泥火山活动及张裂作用, 常常在海底浅

表层形成断裂—褶曲构造、底辟构造、海底扇状地形、“麻坑”地貌和海底地滑等多种形式的构造、沉积、地貌环境, 这些环境与水合物形成密切相关。

大西洋沿岸、南极大陆周边、北冰洋周缘和印度洋周边的多数地区均属非活动大陆边缘。典型的海区包括布莱克洋脊、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、里海及非洲西海岸外等, 这些地区均有水合物产出。综合分析各地水合物的产出特征后可以发现, 非活动大陆边缘的天然气水合物常常与断裂—褶皱组合构造、底辟构造、“麻坑”地貌、碳酸岩壳有关。

1.1 断裂—褶皱组合构造与水合物

早在1970年Markl等就指出在美国东部大西洋的布莱克洋脊地区出现与海底近似平行的强振幅模拟海底反射层(Bottom Simulating Reflector, 以下简称BSR), 地震剖面显示为一褶皱构造, 在BSR之上为一厚层“空白带”, 从脊部向两侧该现象逐渐减弱(Markl et al., 1970; Shipley et al., 1979)。由于断层的切割, BSR呈断续分布, 脊部BSR较强, 至两侧翼部BSR变弱(Rowe et al., 1993; Dillon et al., 1998, 1999)。当时推测BSR代表水合物稳定带之底界, 深海钻探(DSDP)533站在该推测层位见到水合物样品, 与地震解释相吻合(Kvenvolden et al., 1984)。

注:本文为国家自然科学基金项目(编号49972047)资助的成果。

收稿日期:2002-09-06;改回日期:2003-01-03;责任编辑:周健。

作者简介:张光学,男,1965年生,高级工程师。主要从事海洋地质、地球物理和石油地质学研究。通讯地址:510760,广州市黄埔南岗1180信箱,广州海洋地质调查局;Email:zhuguangxue@163.net。

大洋钻探(ODP)164航次在该地区的3个站位(994、995和997)也于BSR之上采到水合物样品,在其空白带的孔隙水氯离子浓度存在低值异常,水合物的下限(约450 m)与地震剖面上的BSR深度相吻合(Paull et al., 1996)。在北卡罗来纳洋脊也得到与布莱克洋脊特征相类似的地震剖面,BSR及其上部的厚层“空白带”清晰可见,海底以下0.5 s出现双相位的强反射层,水深达3 km(Dillon et al., 1983; Max et al., 1998)。

另外在墨西哥湾路易斯安那陆坡、加勒比海南部陆坡区、南美东部海域亚马逊海扇及阿根廷盆地,也发现水合物的BSR及“空白带”显示,其特征与布莱克洋脊相似(Ladd et al., 1984; Collins et al., 1985; Manley et al., 1989; Maslin et al., 1998)。

沿印度西部非活动大陆边缘的下斜坡中部以及海隆区也观察到水合物的BSR、“空白带”及麻坑地形等标志。在海底之下0.35 s处出现BSR,BSR之上依次为声波“空白带”和地震透明带,BSR之下则为声波浑浊带(Veerayya et al., 1998)。

北极地区的波弗特海也是非活动陆缘内与断褶相关的水合物产区。1972年,阿科公司和埃克森公司就从阿拉斯加州北坡地区艾琳2号井的一个岩心(约666 m深)中成功地提取到水合物,随后Collett等(1988)通过对该区445口探井的测井资料分析,认为其中50口探井可能存在水合物,且许多口井中分布有多层水合物。Grantz等(1980)和Kvenvolden等(1990a)认为阿拉斯加波弗特海北部陆架外缘、陆坡和陆隆上部的海底之下有广泛的水合物聚集,海底之下300~700 m处存在明显的BSR,该深度大致接近水合物稳定带之底界,BSR是水合物的底界标志。海底高地形之下普遍出现强振幅BSR,而低地形之下BSR普遍呈弱振幅或缺失(Andreassen et al., 1995)。

挪威西北巴伦支海的熊岛盆地内,在海底以下160~1000 m的浅地层处出现强振幅BSR,且BSR之下的沉积物中反射振幅存在“下拉效应”,推测代表水合物稳定带底界(Laberg et al., 1996, 1998; Mienert et al., 1998)。在巴伦支海斯匹兹卑尔根地区于海底之下0.25 s处出现一组斜切地层的强反射层BSR,在相邻的Storegga滑塌区也于海底之下0.1 s和0.35 s处出现两组强反射层,构成双BSR,且浅层处的BSR与滑移面处于同一深度(Bugge et al., 1987)。

1.2 底辟构造与水合物

美国东部南卡罗来纳陆缘区的水合物与底辟构造伴生。在跨越底辟构造的深穿透低分辨率多道地震剖面中,发现明显的盐上拱并侵入到上覆地层,沿底辟柱两侧的牵引地层出现强反射BSR,BSR之上的地层因层间波阻抗差减少出现空白带。底辟柱顶部有亮点,显示BSR之下的局部地区聚集有游离气(Dillon et al., 1983, 1999)。

非洲西海岸外的被动陆缘是一条受拉张、挤压和小规模底辟构造相互作用的构造带。尼日利亚滨海及刚果扇存在页岩挤压构造、盐底辟构造,以及与深部褶皱塌陷有关的拉张构造、泥火山等。泥、盐底辟构造刺穿年轻地层,相邻刺穿体之间的浅地层处发育有强反射BSR。底辟顶部靠两侧的翼部也存在BSR,与底辟引起的陡倾地层斜切。由于气体可沿盐底辟向上迁移至顶翼部,盐体具有较高的热导率能引起底辟脊温度上升,有利于天然气水合物形成(Uenzelmann-Neben et al., 1997)。

1.3 “麻坑”地貌、碳酸岩壳与水合物

麻坑地貌是被动陆缘区与水合物相关的一种地震识别标志和地貌标志。在外陆架及陆坡区偶尔发现一些地形洼地,通常直径数米至数十米,深数厘米至数十厘米。据统计世界被动陆缘的水合物产区多存在这种现象,如大西洋西海岸、印度西部陆缘、非洲西海岸等。“麻坑”可能是生物气、热成因气等沿断裂向上迁移进入水体所致,“麻坑”之下多为被断层复杂化的褶皱地层,并因气体充填呈倒U形、丘形圆锥、穹状及蘑菇状等构成的声波模糊带,最下部可能为类似底辟柱的构造,垂向上由上至下构筑成“麻坑—断褶复杂化地层—底辟柱”式样的三层楼构造,在麻坑内还常见碳酸岩壳(carbonate crust)。

2 天然气水合物与BSR

据不完全统计,迄今共在世界各海域发现水合物产地85处,其中分布在活动大陆边缘的有30处,分布在非活动边缘的有55处(表1,张光学等,2001)。85处水合物产地中,单独依靠BSR标志推断的有49处,有BSR标志并采到水合物样品的有10处,有BSR标志并有良好测井异常显示的有8处,故存在BSR标志的共67处,占79%,而未发现BSR标志的只有18处,仅占21%。由此可见,BSR是识别水合物的主要标志,但水合物与BSR标志并非严格对应,两者之间可能存在如下三种关系。

(1)有BSR的地区往往也有水合物产出。ODP

164航次于布莱克洋脊有明显 BSR 分布的地方,共施钻5口,均发现有水合物(Paull et al., 1996)。在东太平洋的喀斯凯迪亚增生楔上,ODP 146航次也在 BSR 分布区内的钻孔中打到了结核状和团粒状的水合物,但在 BSR 分布区边界线附近则未发现水合物(Whiticar et al., 1995)。

表 1 世界海域天然气水合物产出位置及其识别标志

Table 1 Worldwide distribution of marine gas hydrates and their identified indicators

海 域	产 出 位 置		识 别 标 志				
	活 动 陆 缘	非 活 动 陆 缘	BSR	BSR 与 采 样	BSR 与 测 井	采 样	其 他 标 志
太平 洋	28	9	23	8	2	2	2
大 西 洋	0	23	11	2	4	4	2
印 度 洋	2	5	6	0	0	0	1
北 冰 洋	0	9	4	0	2	1	2
南 极 周 边 海 域	0	6	4	0	0	0	2
内 海 及 湖 涠	0	3	1	0	0	2	0
总 计	30	55	49	10	8	9	9

(2)有水合物产出的地区未必就有 BSR。ODP 127航次在日本海东北部活动俯冲带上的769A 钻孔中发现有水合物,但在井位附近的地震剖面中并没有观察到 BSR (Shipboard Scientific Party, 1990)。ODP 112航次在秘鲁大陆边缘的2个钻孔中采到块状水合物样品,但地震剖面上也未发现 BSR (Kvenvolden et al., 1990b)。DSDP 84航次在中美海沟处的4个站位发现有水合物,但这些位置也无 BSR 显示(Kvenvolden et al., 1985)。其原因可能是这些地区水合物层之下缺乏游离气,致使含水合物的沉积物与其下伏的沉积物之间波阻抗差极小,从而未出现 BSR。

(3)有 BSR 的地方未必就有水合物。DSDP 84 航次在中美海沟 BSR 分布区施工的两个钻孔中并未发现水合物(Kvenvolden et al., 1985)。目前,大多数有 BSR 的地区,尚有待钻探验证是否确实存在水合物。

综上所述,水合物与 BSR 之间并没有严格的一一对应关系。因为 BSR 受到构造作用、沉积作用、沉积物的有机碳含量、水合物含量以及下伏游离气含量等多种因素的影响。通常有 BSR 地方,往往也有水合物,但也可能没有水合物;反之,没有 BSR 地方,也可能存在水合物。因此,BSR 既不是水合物存在的充分条件,也不是水合物存在的必要条件。

3 非活动大陆边缘天然气水合物的成藏过程

3.1 水合物成藏的气源条件与温压条件

充足的气源条件是水合物成藏的必备条件。沉积物中的有机碳量、生物甲烷的生产率和孔隙流体中的甲烷溶解度是影响气源的3个重要参数。通常热成因气是水合物形成的主要气源,但生物成因气也是不容忽视的气源,特别是近海环境,生物成因气显得更重要,因该环境的浊积岩和沉积物中有一定浓度的有机碳。若生产率较高,则有机碳能形成一定量的甲烷,且随着海底深度增加,甲烷溶解度逐渐增大,当其甲烷含量超过孔隙水中的甲烷饱和度时,生物成因气可形成少量水合物(约占沉积物的2.5%),但不足以形成 BSR 之上的高速尖脉冲地震响应。

合适的温压条件是水合物成藏的外在动力。非活动陆缘地区处在相对稳定的构造环境,具备适宜的温压条件,有利于水合物形成。但因冰川性海平面变化、大规模的新构造变动、沉积载荷效应、地温梯度、海水温度、沉积物含碳量等因素的变化,会引起温压条件的改变,从而引起水合物的形成或分解。这种变化既可有利于新的水合物形成,也可能导致原有水合物分解、重新聚集,并使水合物稳定带向上移位,使水合物的消长处于一个动态的平衡体系中。

3.2 水合物成藏的地质构造条件

纵观世界各地非活动大陆边缘处水合物成藏的地质构造条件,可以发现水合物形成往往与深部断裂、断褶、底辟、垒堑式构造及地滑活动等密切相关。

(1)断裂-褶皱组合构造:在非活动陆缘的盆地边缘、海隆或海台脊部,在水合物稳定带之下经常伴生有多条正断层,正是这些断层为深部气体向浅部运移提供了通道,而浅部的褶皱构造可适时圈闭住运移来的气体,形成水合物及其 BSR。由于浅部沉积层扭曲变形及断裂作用,BSR 显示出轻微上隆并被断层错断复杂化,部分气体可通过断层再向上迁移进入水体形成“麻坑”地貌,也有部分气体被圈闭在水合物层之下的沉积物中,致使 BSR 之下呈杂乱的反射特征。总之,断层-褶皱组合的构造特征,为气体运移、聚集、成藏并最终形成水合物提供了有利条件。

(2)垒堑式构造:非活动陆缘经常发育有一系列半地堑式深水盆地,盆地内往往发育一系列阶梯状的垒堑式构造,通过这些构造周围的深大断裂及构造内部的一系列犁式正断层,深部热成因气向浅部运移并与原地的生物气混合聚集于构造或地层圈闭中形成水合物。这类水合物多见于垒堑式构造周围的大断裂之上或附近,其水合物层主要集中于晚第

三纪浅地层内,与下伏第三纪基岩关系密切。

(3)底辟构造:在地质营力的驱使下,深部或层间的塑性物质(泥、盐)垂向流动,致使沉积层上拱或刺穿,侧向地层遭受牵引,在地震剖面上呈现出轮廓明显的反射中断。非活动陆缘内巨厚沉积层的塑性物质及高压流体、陆缘外侧的泥火山活动及张裂作用,均将导致底辟构造发育,如美国东部陆缘南卡罗来纳的盐底辟构造、布莱克洋脊的泥底辟构造、非洲西海岸刚果扇北部的盐底辟构造、尼日尔陆坡三角洲小规模的底辟构造、里海的泥火山和泥岩底辟等。这些构造能引起构造侧翼或顶部的沉积层倾斜,便于流体排放,有利于形成水合物。

3.3 水合物成藏的聚集机制及模式

影响水合物成藏机制的因素很多,如沉积速率、气体迁移方式等。上新世以来的沉积速率相对较高,由于沉积物在海底的连续快速沉积,上覆沉积载荷的不断增加,下伏沉积物不断下沉,并因压实作用使得其孔隙度逐渐降低,温压条件的改变使得水合物稳定带的底界逐渐上移,原有的水合物将分解释放出烃类气体并向上升移,当其重新进入新的水合物稳定带后,会形成新的天然气水合物,故水合物稳定带的底界附近(也即 BSR 附近)往往是高浓度的水合物(Korenaga et al., 1997)。

对非活动陆缘而言,海台区水合物形成以深部热成因气的垂向迁移为主,海底扇以生物气的横向迁移为主,而海槽及底辟区则以混合气为主。因此,各地的成藏模式也不尽相同。

非活动陆缘的深水区往往发育有多期叠合盆地,深部的中、古生代残留盆地常形成常规油气藏,其气体多以热成因气为主,它们沿断裂向中部的新生代沉积盆地内运移,并与新生界的低成熟烃类混合,然后沿区域不整合面向海底浅表层运移,在适宜的温压域内形成水合物。因此,在非活动陆缘的深水区叠合盆地内,常常发育有深部石油—中部天然气—浅部水合物的“三位一体”烃类能源结构模式。

4 讨论与结论

非活动大陆边缘因其具有充足的物质来源、良好的运移通道和合适的温压条件,是水合物聚集的有利场所。早期的沉陷和张裂活动,使得该类地区接受了巨厚沉积,其底部的裂谷和漂移层序中存在湖相黑色泥岩、页岩等高质量的烃源岩,上覆的巨厚沉积物足以使烃源岩达到成熟,有机质分解出的烃类气体以及地壳深处和油气田中渗出逸散的烃类气体

沿深大断裂和区域不整合面向上运移,在合适的低温高压环境下形成天然气水合物。迄今已在非活动大陆边缘地区发现水合物产地55处,约占全部产地的65%,这也说明非活动大陆边缘地区是寻找天然气水合物的有利场所。

我国东海、南海具有天然气水合物成藏的物源、温压等条件,尤其是在南海北部地区是非活动陆缘区之一,具备良好的天然气水合物成矿条件与找矿前景。新生代期间,在太平洋板块和印度—澳大利亚板块的俯冲作用下,东南亚大陆边缘地壳发生减薄、裂解、漂移、聚敛和碰撞等构造活动。位于东南亚大陆边缘的南海,在这种构造背景下发生一系列的板块活动和构造演化,形成活动型、非活动型和转换型三种不同类型的大陆边缘,并形成不同类型的沉积盆地。南海北部非活动陆缘地区因岩石圈拉张、减薄和裂陷,发育了一系列 NE 向隆坳相间的构造带,形成许多大、中型沉积盆地,其沉积速率较高(≥ 30 m/Ma),沉积厚度较大,而沉积物的快速埋藏造成欠压实环境,可为水合物的形成提供足够的孔隙空间。中中新世以来,海相砂泥岩发育,有机质充足,海底微生物丰富,是良好的烃源岩。在西沙海槽盆地、琼东南盆地和珠二坳陷等深水盆地,由于热焓较高,地温梯度多在 $30\sim 60^{\circ}\text{C}/\text{km}$,可使烃源岩成熟成气,并已形成丰富的常规天然气藏,能为天然气水合物的形成提供充足的气源。

南海北部地区自中中新世后,经历了三次较为明显的构造运动,与之伴生的底辟构造、褶皱及断层构造发育,这些构造有利于水合物生成,但对水合物保存往往不利。在 BSR 之下或边缘部位发育的早期断层,可为下部烃类气体向上运移提供了有利通道,促使气体向上运移到适合水合物形成的温压域内,形成水合物。盆地的快速沉降、充填有利于形成超压流体囊,由于该区的泥、盐底辟及泥火山构造也非常发育,这些构造也能为流体囊内的烃类流体上移提供重要通道。地震剖面显示出部分断层和泥底辟刺穿上覆地层,甚至直达海底,大量的烃类气体逸失形成“气烟囱”,这种现象可作为南海北部陆坡存在天然气水合物的重要证据。该区偶尔的火山活动对水合物形成也有一定的促进作用,它能提高中新世以来的地温梯度,有利于水合物的快速形成,并且有可能使水合物矿层埋藏较浅。当然,当水合物一旦形成后,若这些断层、泥底辟和火山仍继续活动,并切穿浅部的水合物层,这就会破坏水合物原有的温压条件,导致水合物层分解,不利于水合物保存。

总之,南海北部陆缘区构造条件优越,沉积物丰富,天然气水合物的生、储组合较好,所需的物化条件优越,显示出良好的找矿前景(祝有海等,2001;黄永样等,2002;张光学等,2002)。

与活动陆缘相比,非活动陆缘的“冰川性海平面升降、大规模的新构造运动、沉积载荷、含碳量、海水温度及地温梯度”等变化显著,这些无疑是影响水合物成藏的重要因素。但各因素是如何影响原有的水合物,又如何营造有利条件形成新的水合物,以及各因素间的相互影响,目前尚不清楚。对“海洋水合物的形成只限于冰期吗?气体组分对水合物厚度的影响有多大?沉积物类型、沉积速率、沉积时代、有机质丰度与水合物有何关系?水合物形成与分解的正负效应如何?二叠纪—三叠纪之交的古环境、古生物灾变事件与水合物的分解有关吗?”等诸多问题,还有待于今后的深入探索。

参 考 文 献

- 黄永样,张光学,金庆焕,梁金强,赵祖斌. 2002. 南海北部陆坡天然气水合物地质地球物理特征及其前景初探. 见: 庆祝中国地质学会成立80周年学术论文集. 北京: 地质出版社, 421~431.
- 杨子廉. 2000. 海洋地质学. 青岛: 青岛出版社.
- 张光学, 黄永样, 祝有海, 吴必豪. 2001. 活动大陆边缘水合物分布规律及成藏过程. 海洋地质动态, 17(7): 3~7.
- 张光学, 黄永样, 祝有海, 吴必豪. 2002. 南海天然气水合物成矿远景研究. 海洋地质与第四纪地质, 22(1): 75~81.
- 祝有海, 张光学, 卢振权, 陈邦彦, 吴必豪. 2001. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景. 石油学报, 22(5): 6~10.

References

- Andreassen K, Hart P E, Grantz A. 1995. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental-margin of the Beaufort Sea. *J. Geophys. Res.*, 100 (B7): 12659~12673.
- Bugge T, Befring S, Belderson R H, Eidvin T, Jansen E, Kenyon N H, Holtedahl H, Sejrup H P. 1987. A giant three-stage submarine slide off Norway. *Geo-Marine Letters*, 7: 191~198.
- Collins B P, Watkins J S. 1985. Analysis of gas hydrate off southwest Mexico using seismic processing techniques and DSDP Leg 66 results. *Geophysics*, 50(1): 16~24.
- Collett T S, Bird K J, Kvenvolden K A, Magno L B. 1988. Geologic interrelations relative to gas hydrates within the North Slope of Alaska. U. S. Geological Survey Open-File Report 88~389, 150.
- Dillon W P, Popenoe P, Grow J A, Klitgord K D, Swift B A, Paull C K, Cashman K V. 1983. Growth faulting and salt diapirism: their relationship and control in the Carolina Trough, eastern North America. In: *Studies in Continental Margin Geology*. American Association Petroleum Geologists Memoir, 34: 21~46.
- Dillon W P, Danforth W W, Hutchinson D R, Drury R M, Taylor M H, Booth J S. 1998. Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the Southeastern United States. In: Henriet J P, Mienert J, ed. *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society. London: Special Publication, 137: 293~302.
- Dillon W P, Max M. 1999. Seismic reflections identify finite differences in gas hydrate resources. *Offshore*, 13(11): 115~116.
- Grantz A, Dinter D A. 1980. Constraints of geologic processes on western Beaufort Sea oil developments. *Oil and Gas Journal*, 78: 304~319.
- Huang Yongyang, Zhang Guangxue, Jin Qinghuan, Liang Jinjiang, Zhao Zubin. 2002. Prospect and characteristics geoseismics of gas hydrate resources in the northern continental slope of the South China Sea. In: Academic papers of the 80th anniversary of the Geological Society of China. Beijing: Geological Publishing House, 421~431.
- Korenaga J, Holbrook W S. 1997. Natural gas hydrates on the southeast U. S. margin: Constraints from full waveform and travel time inversions of wide-angle seismic data. *J. Geophys. Res.*, 102(B7): 15345~15365.
- Kvenvolden K A, Barnard L A. 1984. Gas hydrates of the Blake Outer Ridge, Site 533, DSDP Leg 76. *Init. Repts.*, DSDP, 76: 353~365.
- Kvenvolden K A, McDonald T J. 1985. Gas hydrates of the Middle America Trench, Deep Sea Drilling Project Leg 84. *Init. Repts.*, DSDP, 84: 667~682.
- Kvenvolden K A, Grantz A. 1990a. Gas hydrates of the Arctic Ocean region. In: *The Geology of North America: The Arctic Ocean Region*. Geological Society of America, 539~549.
- Kvenvolden K A, Kastner M. 1990b. Gas hydrates of the Peruvian outer continental margin. *Proc. Ocean Drill. Program, Sci. Results*, 112: 517~526.
- Laberg J S, Andreassen K. 1996. Gas hydrate and free gas indications within the Cenozoic succession of the Bjornoya Basin, western Barents Sea. *Mar. Petroleum Geol.*, 13: 921~940.
- Laberg J S, Andreassen K, Knutsen S M. 1998. Inferred gas hydrate on the Barents Sea Shelf—a model for its formation and a volume estimate. *Geo-Mar. Lett.*, 18: 26~33.
- Ladd J W, Trushan M, Talwani M, Stoffa P L, Buh P, Houtz R, Mauffret A, Westbrook G. 1984. Seismic reflection profiles across the southern margin of the Caribbean. *The Geological Society of America Memoir*, 162: 153~159.
- Manley P L, Flood R D. 1989. Anomalous sound velocities in near-surface, organic-rich gassy sediments in the central Argentine Basin. *Deep-Sea Research*, 36: 611~623.
- Markl R G, Bryan G M, Ewing J I. 1970. Structure of the Blake—Bahama outer ridge. *J. Geophys. Res.*, 75: 4539~4555.
- Maslin M, Mikkelsen N, Vilela C, Haq B. 1998. Sea-level and gas hydrate controlled catastrophic sediment failures of the Amazon Fan. *Geology*, 26: 1107~1110.
- Max M D, Dillon W P. 1998. Oceanic methane hydrate: the character of the Blake Ridge hydrate stability zone, and the potential for methane extraction. *J. Petrol. Geol.*, 21: 343~358.
- Mienert J, Posewang J, Baumann M. 1998. Gas hydrates along the northeastern Atlantic margin: possible hydrate-bound margin instabilities and possible release of methane. In: Henriet J P, Mienert J, ed. *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability*

- and climate change. Geological Society. London: Special Publication, 137: 275~291.
- Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al. 1996. Proc. Ocean Drill. Program, Initial Reports, 164: 623.
- Rowe M M, Gettrust J F. 1993. Faulted structure of the bottom simulating reflector on the Blake Ridge, Western North Atlantic. *Geology*, 21: 833~836.
- Shipboard Scientific Party. 1990. Site 796. Proc. Ocean Drill. Program, Initial Reports, 127: 247~322.
- Shipley T H, Houston R T, Buffler R T, Shaub F J, Macmillen K J, Ladd J W, Worzel J L. 1979. Seismic reflection evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises. *Bull. of AAPG*, 63: 2204~2213.
- Uenzelmann — Neben G, Spiess, Volkhard, Bleil, Ulrich. 1997. A seismic reconnaissance survey of the northern Congo Fan. *Marine Geology*, 140 (3~4): 283~306.
- Veerayya M, Karisiddaiah S M, Vora K H, Wagle B G, Almeida R. 1998. Detection of gas-charged sediments and gas hydrate horizons along the western continental margin of India. In:
- Henriet J P, Mienert J, ed. *Gas Hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society. London: Special Publication, 137: 239~253.
- Whiticar M J, Hovland M, Kastner M, Sample J C. 1995. Organic geochemistry of gases, fluids, and hydrates at the Cascadia accretionary margin. *Proc. Ocean Drill. Program, Sci. Results*, 146: 385~397.
- Yang Zigeng. 2000. *Marine Geology*. Qingdao: Qingdao Press (in Chinese).
- Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, Wu Bihao. 2001. Gas hydrate in the Active continental margin and its pool-formation process. *Marine Geology Development*, 17(7): 3~7.
- Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, Wu Bihao. 2002. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22: 75~81.
- Zhu Youhai, Zhang Guangxue, Lu Zhenquan, Chen Bangyan, Wu Bihao. 2001. Gas hydrate in the South China Sea: background and indicators. *Acta Petrolei Sinica*, 22(5): 6~10.

Gas Hydrate on the Passive Continental Margin and Its Pool-formation Process

ZHANG Guangxue¹⁾, ZHU Youhai²⁾, XU Huaning¹⁾

1) *Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou, 510760*

2) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract

The passive continental margin is a comparatively weak region of plate tectonic movement, but it is a favorable region for gas hydrate. Up to now, more than two thirds of marine gas hydrates are distributed in passive continental margins. Comprehensive study of gas hydrate accumulations in passive continental margins shows that gas hydrate is closely related to fault-fold combination structures, diapiric structures and pockmarks. The bottom simulating reflector (BSR) is the most important indicator for identifying gas hydrates, but it is not a feasible indicator since there is no strict corresponding relationship between gas hydrate and the BSR. There are plentiful gas resources and suitable temperature and pressure conditions for gas hydrate on passive continental margins. Furthermore, fault-fold structures, horst-graben structures and diapiric structures provide favorable tectonic environments for the migration, enrichment and pool-formation of hydrocarbon gases, which will ultimately form gas hydrates in these regions. Multiple superimposed basins are frequently developed in deep-water regions of passive continental margins, and usually a composite hydrocarbon accumulation model is formed in these regions, which is characterized by deep oil, middle gas and shallow gas hydrate because of their internal links in regard to hydrocarbon origin, temperature, pressure, structure and sedimentary conditions.

Key words: passive continental margin; gas hydrate; bottom simulating reflector; pool-formation process