

# 澳大利亚西北陆架盆地天然气水合物成矿地质条件及资源潜力

赵汗青<sup>1</sup>, 李春雷<sup>1</sup>, 吴时国<sup>2</sup>, 王 征<sup>1</sup>

(1. 中海油服物探事业部数据解释中心, 天津 300451; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 澳大利亚西北陆架盆地已被证实具有丰富的油气资源, 而天然气水合物的相关研究尚未开展。本文利用天然气水合物地震识别技术, 同时结合对澳大利亚西北陆架盆地天然气水合物成矿地质条件的分析, 认为澳大利亚西北陆架盆地天然气水合物储量巨大, 初步估计天然气水合物分布区蕴含甲烷量达 18 万亿 m<sup>3</sup>。澳大利亚西北陆架盆地的构造演化是天然气水合物成藏所具备物化条件的基础, 因此是天然气水合物成矿的重要影响因素之一。

**关键词:** 天然气水合物; 澳大利亚西北陆架; 成矿地质条件; 资源潜力

中图分类号: p618.13 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)03-0056-07  
doi: 10.11759/hyqx20131024001

天然气水合物是由天然气分子与水分子构成的笼型化合物, 外观似冰, 能燃烧, 又叫“可燃冰”。它在能源、环境和灾害方面都具有十分重要的意义。天然气水合物主要赋存于水深 300 m 以下的海底和永久冻土带<sup>[1]</sup>。它的大量形成需具备如下几个条件: 合适的温度和压力、充足的天然气源以及沟通天然气源和水合物赋存带的地质构造。截至 2005 年, 全球已有 30 多个国家和地区开展了天然气水合物调查工作, 发现天然气水合物存在标志或实物样品的区域总计 116 个。其中, 陆地 38 处(永久冻土带), 海洋 78 处<sup>[2]</sup>。2007 年, 中国在南海北部陆坡区神狐海域实施的科研钻探工作中, 取得了天然气水合物实物样品, 成为继美国、日本、印度之后第 4 个通过国家级研发计划取得这一突破的国家<sup>[3]</sup>。

澳大利亚西北陆架盆地现位于欧亚板块、太平洋板块和印澳板块结合部位, 是在古生代—中生代冈瓦纳大陆破裂的基础上, 最终形成的被动大陆边缘盆地。从西南到东北主要分布着北卡那封、柔布克、布劳斯和波拿巴盆地(图 1)。产自北卡那封盆地的液化天然气(LNG)已出口到中国, 中海石油有限公司也参与了西北陆架主要含油气盆地的油气勘探开发<sup>[4]</sup>。依据最新的区域地震资料解释成果, 中生代以来盆地的构造演化主要经历了裂前拗陷、裂谷、过渡和裂后被动大陆边缘四个阶段<sup>[5-7]</sup>。在区域构造演化的控制作用下, 发育了多套沉积层序建造, 为烃类化合物的生成与赋存奠定了坚实的物质基础。澳大利亚西北陆架盆地水深大于 300 m 的海域超过其

总面积的 1/3, 且为十分富气而相对贫油的油气区<sup>[8-9]</sup>。虽然本区域是目前全球深水油气勘探开发的热点地区之一, 但整体的勘探程度较低, 本区域是否发育天然气水合物尚无相关报道, 本文根据天然气水合物地震识别技术, 同时结合澳大利亚西北陆架天然气水合物成矿的地质构造环境分析, 认为本区域也是天然气水合物赋存有利地区之一, 此项研究工作的意义在于填补了澳大利亚西北陆架盆地天然气水合物研究工作的空白。

## 1 天然气水合物存在的地震异常

在各种海域天然气水合物勘探技术中, 地震勘探方法是最快速有效的方法之一, 其主要识别标志包括: 似海底反射波(BSR)、振幅空白、极性反转和速度倒置等。其中, 海底沉积物中存在天然气水合物最重要且最实用的标志是 BSR 的存在。在钻井之前, BSR 是公认的认识天然气水合物赋存的地球物理标志, 这已经为许多实际资料, 如钻井资料所证实<sup>[1]</sup>。

地震剖面上的 BSR 通常指示了含天然气水合物沉积层与含游离气沉积层或含水沉积层的相边界。因此, 天然气水合物稳定带底界的确定就可以归结为 BSR 的确定。BSR 在地震叠加剖面上一般表现为以下特征: (1)与海底反射几乎平行; (2)与海底反射

收稿日期: 2013-10-24; 修回日期: 2014-01-22

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05030)

作者简介: 赵汗青(1980-), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 硕士, 主要从事地震资料解释与油气地质综合研究, 电话: 022-25821277, E-mail: hqzhao@126.com



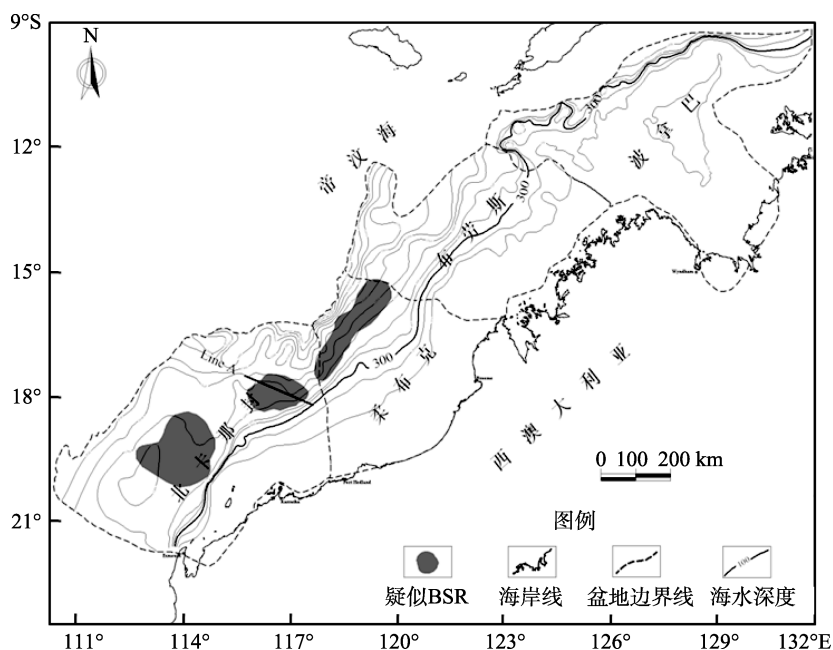


图3 澳大利亚西北陆架盆地天然气水合物BSR分布图

Fig. 3 The BSR distribution of gas hydrate in North-West Shelf basins, Australia

谷断层和形变,致使三叠纪晚期 Fitzroy 构造运动形成的沉积拗陷雏形进一步发育,形成了一系列北东向展布的掀斜断块、地垒和地堑。主要断层控制不同构造单元的地层沉积。裂谷期的沉降中心位于西北陆架各盆地的主要沉积拗陷带,发育巨厚,各盆地拗陷带中—下侏罗统烃源岩均达到成熟和过成熟,是3个盆地中都发育的重要烃源岩,西北陆架的油气田大部分都源自这种类型烃源岩,油气兼生,以气为主<sup>[7]</sup>。

过渡阶段主要从晚侏罗世持续到早白垩世的阿普特期。这一阶段断裂活动相对趋缓,除部分控凹断层外,较少有断层断穿上侏罗统和下白垩统地层,主要以拗陷沉积演化为主。沉降中心有继承、有偏移,西北陆架西南部沉积较厚,中北部变薄。下白垩统下部烃源岩部分成熟,仅在布劳斯和波拿巴盆地为中到较好烃源岩,其他区域均为成熟<sup>[7]</sup>。

早白垩世阿普特期以后,盆地开始了被动大陆边缘的演化进程,以拗陷沉积为主,部分地区断层发育。其中最重要的一次构造事件为:渐—中新世时期,澳大利亚板块和欧亚板块碰撞,发生构造挤压及大规模的左旋剪切作用,造成部分早期断裂活化,同时又产生了一系列的浅层断裂<sup>[7]</sup>。

根据前人研究成果显示,基于近30 000个烃源岩样品(包括岩心、井壁取心和钻屑)实物及多个相关

数据库资料,对澳大利亚西北陆架的烃源条件进行了全面分析,结果表明:澳大利亚西北陆架从二叠纪到早白垩世发育了多套优质烃源岩,全部形成于裂谷原型盆地之中。以海相泥页岩为主,有机碳质量分数一般为1%~5%,最高达13.9%;干酪根主要是II、III型,以生气为主<sup>[8-14]</sup>。勘探结果表明:澳大利亚西北陆架盆地油气资源主要以天然气为主,天然气可采储量大于820亿m<sup>3</sup>的大型及准大型气田21个,大多数分布于300m水深以下及附近,这也跟澳大利亚西北陆架现今“富气贫油,内油外气,大型气田位于远岸带深水区”的状况相吻合<sup>[11]</sup>。因此,该区具有天然气水合物形成的充足气源。

## 2.2 与天然气水合物富集有关的地质构造条件

澳大利亚西北陆架位于三大板块的交汇部位,各个时期均发生了多次构造运动和普遍的沉积事件,广泛发育了浅层活动断裂、盐泥底辟、海底滑塌体和海底扇等与天然气水合物密切联系的构造沉积体(图4),这些构造沉积体的发育已被证实对天然气水合物的形成起着重要的作用<sup>[15-16]</sup>。

裂谷阶段中深层断裂和裂后被动大陆边缘阶段板块碰撞发育的浅层断裂的梯级组合,使天然气可以运移到海底浅部的天然气水合物赋存带成矿,起到了沟通运移的作用<sup>[1, 17-18]</sup>。

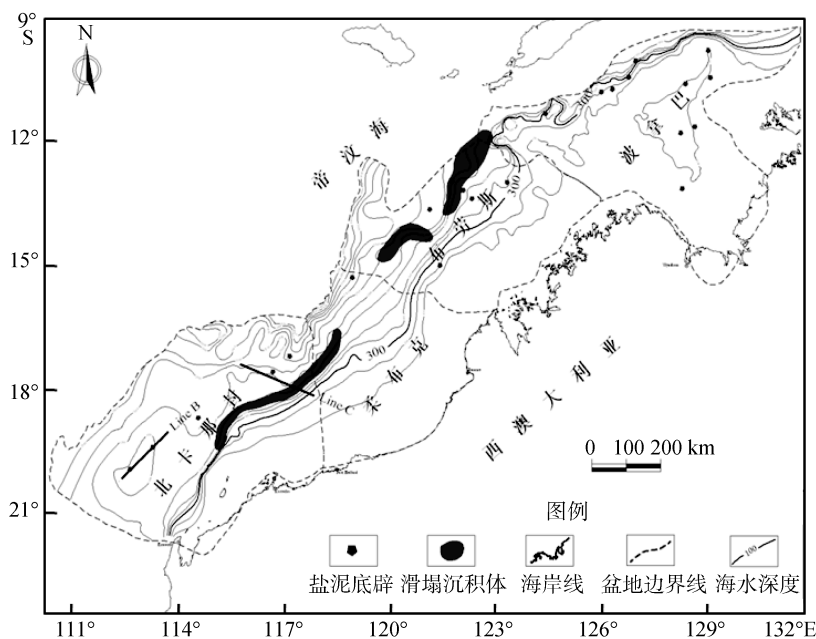


图 4 澳大利亚西北陆架天然气水合物有利成矿构造分布图

Fig. 4 The distribution of favorable structure related to gas hydrate in North-West Shelf basins, Australia

除断裂构造外,盐、泥底辟构造是天然气向上运移至水合物稳定带形成天然气水合物的另外一个重要通道,其在澳大利亚西北陆架被动大陆边缘各盆地也较为发育(图5),其与浅部断裂的梯级组合使天然气向海底浅部运移沟通的作用更为显著<sup>[19-20]</sup>。

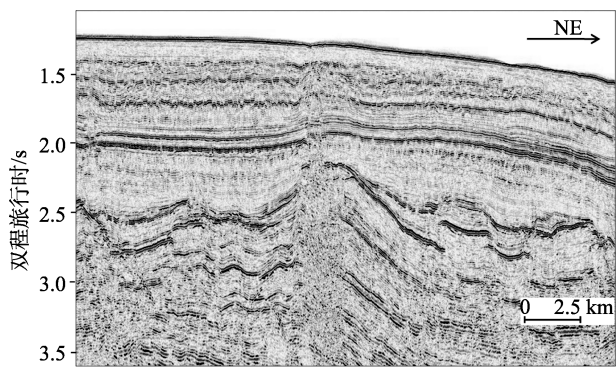


图 5 北卡那封盆地测线 Line B 中盐、泥底辟构造

Fig. 5 Salt and mud diapiric structure of Line B in North Carnarvon basin

滑塌体等特殊构造也是天然气水合物成矿的主要地质载体,它的存在通常与水合物的分解有关,因此它也是天然气水合物存在的标志构造体之一<sup>[1, 15-18]</sup>,其在澳大利亚西北被动大陆边缘大陆坡上发育广泛(图 6)。

### 2.3 天然气水合物成矿温压条件

澳大利亚西北陆架属于被动大陆边缘,具备天

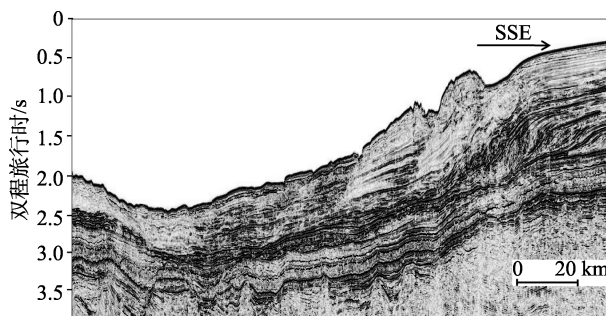


图 6 北卡那封盆地测线 Line C 中滑塌体构造

Fig. 6 The slumps structure of Line C in North Carnarvon basin

然气水合物形成的有利温度和压力条件。水深大于 300 m 的海域超过澳大利亚西北陆架总面积的 1/3,已有大量文献报道由于温度、压力条件适合,在全球范围内,超过这一深度的海域是天然气水合物发育的有利地区<sup>[1, 21-24]</sup>。

在没有特殊热事件存在的情况下,300 m 水深以下的海底温度主要稳定在 2~4℃左右,天然气水合物存在的极限温度为 25℃,因此只要在这一深度以下的海底浅层沉积物中不存在过高的地温梯度,就有可能赋存较厚的天然气水合物成矿层,而尚无文献报道澳大利亚西北陆架深水区域海底浅层具有异常高的地温梯度,导致海底及其浅层沉积物温度过高,进而限制天然气水合物发育的情况存在。

天然气水合物存在的压力条件并不苛刻,在温

度条件满足的前提下, 只需 30 个左右的大气压即可生成, 而超过 300 m 的水深再加上海底浅层沉积物的载荷很容易满足这一条件。另有证据表明, 澳大利亚西北陆架盆地中的北卡那封盆地, 深部烃源岩发育有超压, 而浅层则处于常压或过渡压力区<sup>[8, 25-26]</sup>, 研究区天然气具备由深部的高势能区向浅部的低势能区流动的总趋势, 因而进一步有利于深部天然气运移至天然气水合物稳定带赋存成矿<sup>[1]</sup>。

所以, 通过与全球其他相似海域类比, 并综合现有资料判断, 研究区具备天然气水合物发育的温度及压力条件, 较为稳定的被动大陆边缘环境为天然气水合物的形成与赋存提供了广阔的空间。

### 3 天然气水合物资源潜力估算

通过对研究区与天然气水合物有关的地震异常的识别, 结合研究区天然气水合物成矿地质条件的分析, 初步圈定了澳大利亚西北陆架天然气水合物成矿远景区主要位于北卡那封、柔布克和布劳盆盆地外侧的西部隆起带。其中对各个盆地的天然气水合物成矿远景分析如下。

北卡那封和柔布克盆地是天然气水合物最有利发育区。水深超过 300 m 海域面积较大, 超过盆地面积的 50%, 烃气来源充足; 不利条件是沟通气源与天然气水合物成矿带断裂较少, 盐泥底辟也较少发育。

布劳斯盆地是研究区天然气水合物次有利发育区。水深超过 300 m 海域占盆地面积的 1/3, 烃气来源也很丰富, 迄今已发现 4 个大型气田, 与北卡那封和柔布克盆地类似, 断至天然气水合物赋存层位的浅层断裂不甚发育, 盐泥底辟也不太发育, 另外本盆地裂陷期的局部变热和强烈的火山作用也有可能导地温梯度过大, 最终限制了天然气水合物的成藏的厚度和范围。

波拿巴盆地是研究区天然气水合物不利发育区。虽然本盆地渐—中新世澳大利亚板块与欧亚板块的碰撞导致后期的断裂活化作用非常明显, 发育了大量沟通气源与天然气水合物聚集层位的浅层断裂, 同时大量的盐泥底辟发育也为烃气向上运移提供了通道, 但是本盆地水深普遍不超过 300 m, 所以, 比较而言波拿巴盆地是澳大利亚西北陆架天然气水合物最不发育的盆地, 其最可能赋存区域为盆地西北紧邻帝汶海槽一侧的狭长条带, 分布范围非常局限。

最后笔者利用体积估算法对研究区天然气水合物总资源量进行了初步的估算。

$$V = AZ\Phi HE$$

其中:  $V$  为水合物总资源量;  $A$  为水合物分布面积(合计 70 000 km<sup>2</sup>, 主要参考研究区与天然气水合物有关的地震异常区面积);  $Z$  为水合物稳定带平均厚度(40 m, 主要参考 2007 年我国南海北部陆坡神狐海域钻遇天然气水合物沉积层最大厚度);  $\Phi$  为沉积物有效孔隙度(40%);  $H$  为孔隙中水合物饱和度(10%);  $E$  为水合物中天然气容积倍率(160, 假定天然气均为甲烷)。

研究区天然气水合物成矿远景区大约蕴含甲烷量为 18 万亿 m<sup>3</sup>, 约合 180 亿 t 油当量。

### 4 结论

1) 澳大利亚西北陆架盆地发现广泛分布的 BSR, 推断该海域蕴藏着丰富的天然气水合物, 其天然气水合物储量巨大, 初步估计天然气水合物分布区蕴含甲烷量达 18 万亿 m<sup>3</sup>。其中北卡那封和柔布克盆地是天然气水合物最为发育的区域, 布劳斯盆地次之, 波拿巴盆地最不发育。

2) 澳大利亚西北陆架盆地位于稳定的被动大陆边缘, 水深超过 300 m 的海域“富气贫油”, 气源充足, 同时具备适于天然气水合物赋存的良好温压条件, 以及沟通天然气源和水合物赋存带的地质构造。构造演化是天然气水合物成藏所具备的 3 个条件的基础, 因此是天然气水合物成矿的重要影响因素之一。

#### 参考文献:

- [1] 吴时国, 姚伯初. 天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-307.
- [2] 许红, 黄君权, 夏斌, 等. 最新国际天然气水合物研究现状及资源潜力评估(下)[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 18-23.
- [3] 付少英, 陆敬安. 神狐海域天然气水合物的特征及其气源[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(9): 6-10.
- [4] 白国平, 殷进垠. 澳大利亚北卡那封盆地油气地质特征及勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 253-258.
- [5] 姜雄鹰, 傅志飞. 澳大利亚北波拿巴盆地构造地质特征及勘探潜力研究[J]. 石油地质与工程, 2010, 4: 12-15.
- [6] 姜雄鹰, 傅志飞. 澳大利亚布劳斯盆地构造地质特征及勘探潜力研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 2: 54-57.
- [7] 张建球, 钱桂华, 郭念发. 澳大利亚大型沉积盆地与

- 油气成藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1-210.
- [8] 冯杨伟, 屈红军, 张功成, 等. 澳大利亚西北陆架深水盆地油气地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 131-140.
- [9] 冯杨伟, 屈红军, 张功成, 等. 澳大利亚西北陆架深水盆地油气分布规律[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 99-104.
- [10] 汪伟光, 童晓光, 喻莲, 等. 澳大利亚西北大陆架油气分布及成藏主控因素[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(1): 10-18.
- [11] 温志新, 王兆明, 胡湘瑜, 等. 澳大利亚西北大陆架被动大陆边缘盆地群大气田分布与主控因素[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(12): 41-47.
- [12] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 369-378.
- [13] 方欣欣, 于兴河, 李胜利, 等. 澳洲西北及南部被动陆缘油气差异分布[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1821-1829.
- [14] 许晓明, 于水, 骆宗强, 等. 澳大利亚西北大陆架与尼日尔三角洲、坎波斯盆地油气地质条件的对比研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(1): 28-34.
- [15] 沙志彬, 郭依群, 杨木壮, 等. 南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 89-98.
- [16] 龚跃华, 吴时国, 张光学, 等. 南海东沙海域天然气水合物与地质构造的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 99-104.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 徐宁, 吴时国, 王秀娟, 等. 东海冲绳海槽陆坡天然气水合物的地震学研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 2: 564-571.
- [20] 赵汗青, 吴时国, 徐宁, 等. 东海与泥底辟构造有关的天然气水合物初探[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 115-122.
- [21] Andreassen K, Hart P E, Granz A. Seismic studies of a BSR related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B7): 12659-12673.
- [22] Hovland M, Gallagher J W. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: example from the Niger Delta front [J]. Marine and Petroleum, 1997, 14(3): 245-255.
- [23] Kvenvolden K A, Ginsburg G D, Soloviev V A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrate [J]. Geo-Marine Letters, 1993, 13: 32-40.
- [24] Wu Shiguo, Zhang Guangxue, Huang Yongyang, et al. Gas hydrate occurrence in the northern South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2005, 22: 403-412.
- [25] Peter V R, Richard H, Peter T. The origin of overpressure in the Carnarvon Basin, Western Australia: implications for pore pressure prediction[J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10: 247-257.
- [26] He Sheng, Middleton M, Kaiko A, et al. Two case studies of thermal maturity and thermal modeling within overpressure Jurassic rocks of the Barrow Sub-basin, North West Shelf of Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 143-159.

# Geological conditions and resource prospect of gas hydrate in North-West Shelf basins, Australia

ZHAO Han-qing<sup>1</sup>, LI Chun-lei<sup>1</sup>, WU Shi-guo<sup>2</sup>, WANG Zheng<sup>1</sup>

(1. Data Processing and Interpretation Centre of Geo-COSL, Tianjin 300451, China. 2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Oct., 24, 2013

**Key words:** gas hydrate; North-West Shelf basins of Australia; metallogenic geological conditions; resource prospect

**Abstract:** It has been confirmed that the North-West Shelf basins of Australia are rich in oil and gas resources, however, related research on gas hydrate has not been carried out so far. Using gas hydrate seismic identification technology, combined with the analysis of metallogenic conditions, we inferred that the north-west shelf basins of Australia are rich in gas hydrates. The preliminary estimation indicated that the quantity of methane in gas hydrate distribution area can reach 18 trillion m<sup>3</sup>. The tectonic evolution of the north-west shelf basins of Australia is the basis for physical-chemical conditions of gas hydrate accumulation, so it is one of key factors for gas hydrate generation.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)