

巴基斯坦马克兰增生楔天然气水合物的主控因素

龚建明^{1,2,3}, 廖 晶^{1,2,3}, 孙 晶^{1,2,3}, 杨传胜^{1,2,3}, 王建强^{1,2,3},
何拥军^{1,2,3}, 田瑞聪^{2,3,4}, 程青松^{2,3,5}, 陈志强^{2,3,6}

(1 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266061;

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

4 中国地质大学(北京), 北京 100083; 5 长江大学资源与环境学院, 武汉 4301001;

6 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘 要:为了探讨马克兰增生楔天然气水合物的主控因素,对收集的大量文献资料进行了整理和分析,发现马克兰增生楔由西到东、由南往北逆冲断裂的活动性具有逐渐减弱的趋势,BSR 的振幅和连续性同样具有逐渐减弱的趋势,因此,马克兰增生楔 BSR 的产状主要受断裂构造的影响。马克兰增生楔沉积厚度大,SMI 界面浅,水合物样品具有气泡结构以及 BSR 之下存在较厚的游离气表明,该区天然气水合物的气源充足。同时,低角度的北向俯冲造就的 E—W 向平行排列的南向逆冲断层以及小型正断层等为天然气向上运移提供了通道。由此可知,构造作用是马克兰增生楔天然气水合物的主控因素。

关键词:主控因素;天然气水合物;马克兰增生楔;巴基斯坦

中图分类号:TE53

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.12002

1 区域地质背景

马克兰增生楔位于阿拉伯海北部^[1](图 1),具有沉积厚度大、俯冲角度低、北向俯冲与断裂南向活化、气源充足而水合物埋深浅等特征。其东西长约 800 km,南北宽约 500 km(海域 150 km,陆域 350 km),沉积厚度达 7 000 m 以上。阿拉伯板块以 $<2^\circ$ 和 30~50 mm/a 俯冲速率往北俯冲到欧亚板块之下,俯冲时间从白垩纪一直持

续到现在,其中,西部的俯冲速率(36.5 mm/a)小于东部(42 mm/a)。

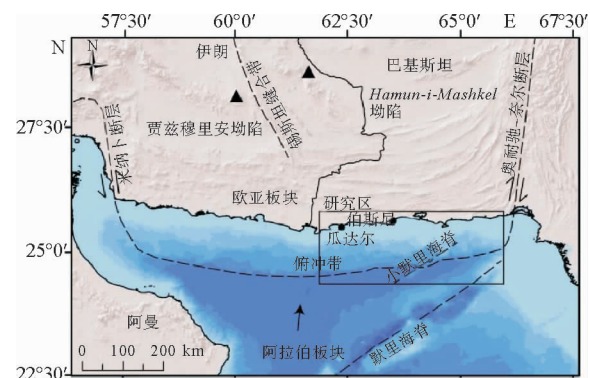


图 1 巴基斯坦马克兰增生楔大地构造位置(据文献[1])

Fig. 1 Location of the Makran accretionary wedge indicating the main tectonic features, offshore Pakistan (from reference [1])

收稿日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金(41273066);国家青年科学基金(41406080);国家专项(GZH201100304, DD20160155)

作者简介:龚建明(1964—),男,博士,研究员,主要从事海洋油气与天然气水合物方面的研究工作。E-mail:gongjianm@aliyun.com

马克兰增生楔的海区部分由狭窄的陆架(宽 10~15 km)和宽阔的大陆坡以及变形前缘构成。其中,大陆坡由 3 个地貌单元组成,分别是①倾角为 10°~20°、宽 50~60 km 的下陆坡,由叠瓦状逆冲断层形成,部分逆冲断层倾角>20°(图 2);②近于平坦宽 15~20 km 的中陆坡,由阶地和坡脊组成;③倾角 7°宽 40 km 的上陆坡,而变形

前缘位于未扰动的深海平原沉积物与增生楔之间,其构造通常表现为宽缓褶皱。

阿拉伯海北部是世界上生物产率最高和沉积速率很高的地区。阿拉伯海北部 150~1 100 m 的水深范围内存在一个最低含氧带(OMZ)^[2],快速的构造抬升、狭窄的陆架和强烈的侵蚀作用使其沉积速率高达 0.2~>1 mm/a^[3],有利于大量有机质的沉积和保存。

20 世纪 90 年代和 21 世纪初,以德国为首的外国科研机构在马克兰增生楔开展过 2 个航次的调查(SO122、123、124、130 以及 M74/3),调查内容主要涉及构造、气体渗漏、冷泉分布、水合物对环境影响等方面。科研人员在地震剖面上发现了泥底辟、泥火山、BSR 及 BSR 之下 200 m 以上的游离气层(表 1、图 3),同时,利用 ROV 在 14 个“羽状流”(Flare)站位发现了与水合物有关的菌席。其中,在水深 1 000 m 的 2 号和水深 2 900 m 的 5 号站位分别采集到了水合物样品(图 4),分布在海底之下 10~12 cm 和 1.5 m 的沉积物中^[4]。

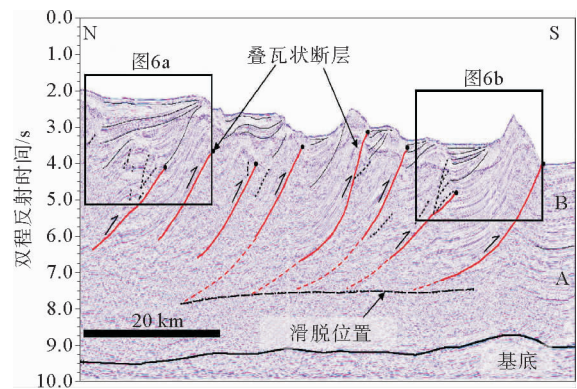


图 2 马克兰增生楔叠瓦状逆冲断层(据文献 [1])
Fig. 2 The imbricate thrusts of Makran accretionary wedge (from reference [1])

表 1 巴基斯坦海域与天然气水合物有关的调查研究

Table 1 The involved survey and research of gas hydrates offshore Pakistan

年份	研究人员/调查单位	调查内容	研究成果
1977	White 等	马克兰增生楔构造特征	存在水合物地球物理标志 BSR、BSR 之下存在游离气
1997	BGR, GEOMAR BREMEN	研究范围:阿曼湾—印度河水下扇太阳号 SO122、123、124;重、磁、震、地质取样	地震剖面上存在 BSR
1998	BGR, NIO, GEOMAR, HDIP	太阳号 SO130;气体渗漏、冷泉	气体渗漏、冷泉、水合物环境效应
2000	Ingo 等	对 1997 年太阳号采集的资料进行重处理解释	马克兰增生楔存在水合物,BSR 之下存在 200 m 的低速层
2000	Sain 等	对 1997 年太阳号资料进行全波形反演	BSR 之下存在 200~350 m 含气层
2004	巴基斯坦地质调查局 巴基斯坦海洋研究所	租用 marine 调查船进行水合物调查	气体渗漏、冷泉、水合物环境效应
2007	汉堡大学、不莱梅大学	流星号 M74/3;马克兰增生楔冷泉调查	采集到水合物样品、发现羽状流、菌席、贻贝、螃蟹和虾等生物,水合物饱和度 4%~29%,BSR 以下游离气 1%~7.5%
2010	Gerome Calves	老地震资料重处理、AVO 反演	印度河水下扇发现 BSR

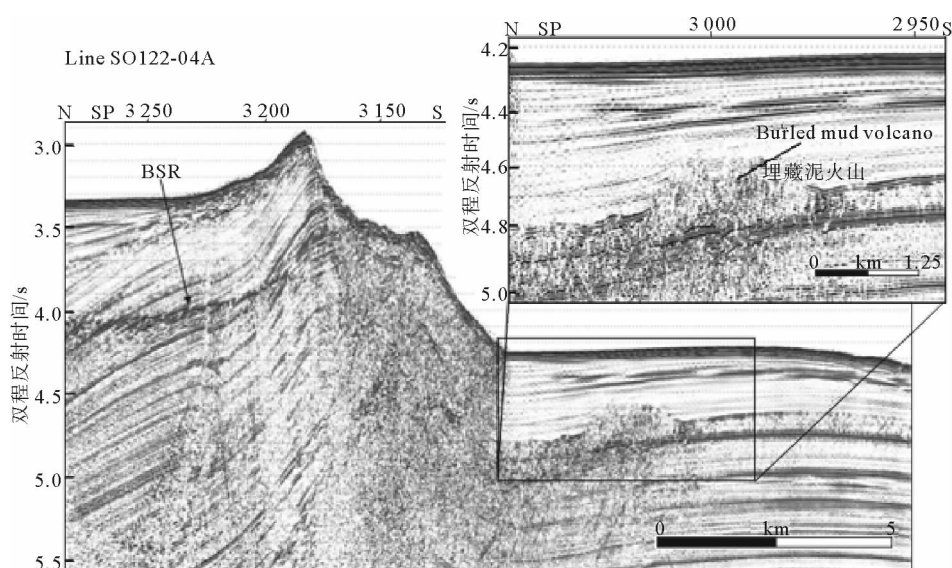


图 3 SO122-04A 地震剖面上的 BSR 及泥火山(据文献[1])

Fig. 3 The BSR and mud volcano from the profile of SO122-04A (from reference [1])



图 4 马克兰增生楔水深 1 000 m 的 2 号羽状流站位的水合物样品(具气泡结构)(据文献[4])

Fig. 4 The gas hydrate samples from Flare 2 at about 1 000 m of water depth (from reference [4])

2 马克兰增生楔的构造活动特征

在全球构造格局中,马克兰增生楔处于十分特殊的位置。由于阿拉伯板块以低角度俯冲到欧亚板块之下,因而,马克兰增生楔南北宽达 500 km。同时,由于近 S—N 向的俯冲,马克兰增生楔上分布了相互平行的 E—W 向的向南逆冲的断裂,其活动性具有由北向南不断增强的趋势,即从不活动到间歇性活动到活动;而由西往东断裂的活动性具有减弱的趋势(图 2、5)。

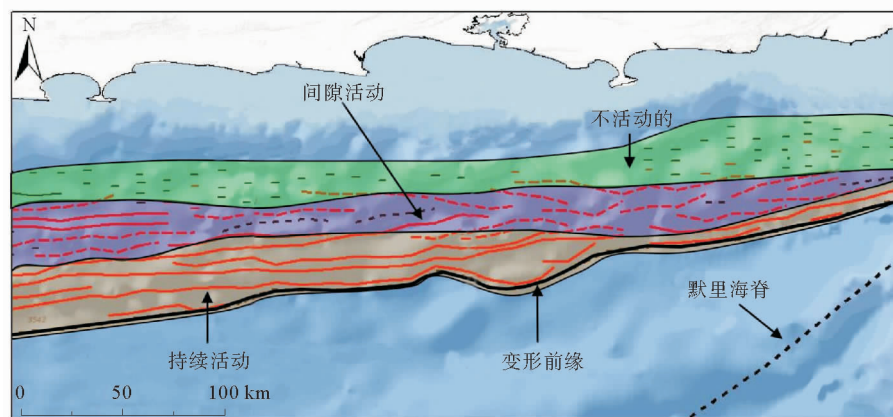


图 5 马克兰增生楔断裂活动分布(南强北弱、西强东弱)(据文献[1])

Fig. 5 Plot of fault activity along the Makran accretionary wedge (from reference [1])

在断层活动性较弱的北部地区(图 6a),逆断层位于水平的未变形的沉积物之下,BSR 不清楚,表现为振幅弱和连续性差。而在断层活动性较强的南部地区(图 6b),75%的逆断层都处于活动状态,沉积物向上变细,BSR 清楚而连续。特别是在马克兰增生楔的最南端,由于增生楔前缘断裂活动强,构造隆升导致水合物稳定带水合物分解,在稳定带底部富集了大量的游离气,因而,BSR 特征更加清晰。

马克兰增生楔的断层性质主要为断距较大的南向逆冲断层和断距较小的正断层,从逆冲断层的分布位置来看,主要分布在增生楔前缘的下陆坡(图 2),大多数逆冲断层的断距 <300 m。从北到南,马克兰增生楔逆冲断裂的形成时间越来越晚,到增生楔的最南端有相当一部分逆冲断层出露海底。由于逆冲断层的倾角很陡,常常发生垮塌掩盖了气体渗漏点,目前所见的逆断层海底出露处通常没有气体渗漏。因此,有人认为浅部流

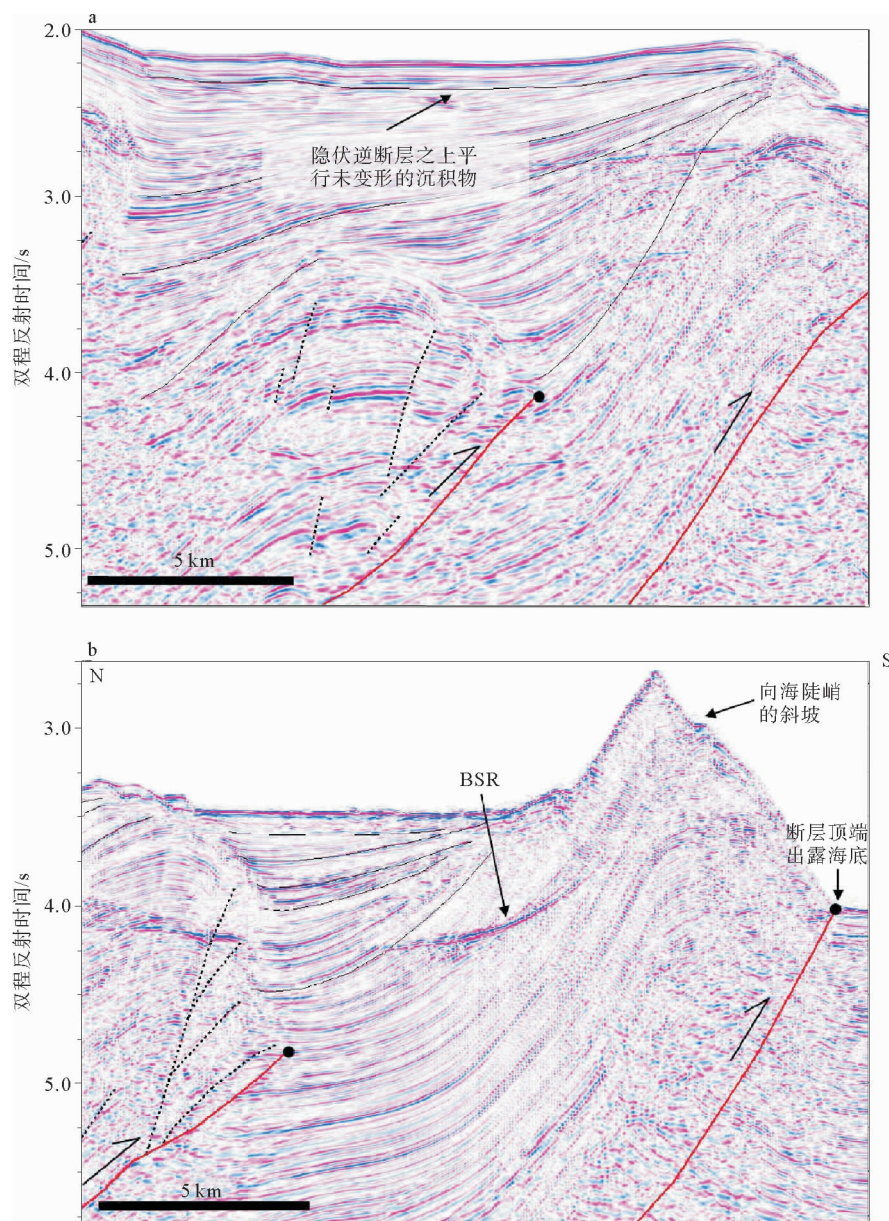


图 6 马克兰增生楔断裂活动与 BSR(南部 BSR 清楚)的关系(据文献[1])

Fig. 6 The relation between BSR and fault activity along the Makran accretionary wedge (from reference [1])

体主要通过小型正断层而非活动的逆断层到达海底^[5]。然而,从断裂的活动性与 BSR 的分布情况来看,历史上逆冲断层可能对深部气体的向上运移起过重要的作用。

3 马克兰增生楔的 BSR 分布

地震剖面解释显示,马克兰增生楔 BSR 大多分布在增生楔外侧,BSR 存在于水深 500~3 000 m 的深海沉积物中,埋深于海底之下 500~800 m (图 3)。

马克兰增生楔的西部和中部 BSR 连续性较好,振幅较强,东部 BSR 连续性较差且振幅较弱,在最东部的地震剖面上甚至缺少 BSR;南部和北部也广泛发育 BSR,只是南部的 BSR 振幅和连续性更好(图 2)。在地震剖面上,深海平原的沉积地层几乎为平行地层,BSR 显示不清,而且显示为游离气的振幅增强体在深海平原较少,说明阿曼湾沉积物中的游离气数量比增生楔沉积物中的游离气数量少^[1],这与深海平原浅层断裂不发育可能有关。

从深海平原到大陆斜坡,BSR 能量增强,BSR 之下游离气增多,水合物的形成仅限于能获得大量甲烷的区域。因此,沉积作用和构造抬升是控制巴基斯坦外海 BSR 特征的关键因素。另外,随着阿拉伯板块向北俯冲到欧亚板块之下,马克兰增生楔前缘的构造抬升造成水合物的多次分解和多次再生。在增生楔前缘水合物稳定带之下聚集了大量的游离气,形成了振幅较强的 BSR,所以,水合物再生作用是控制马克兰增生楔 BSR 产状的关键因素。

4 马克兰增生楔天然气水合物气源充足

某个海域天然气水合物的气源状况主要取决于沉积物中总有机碳的含量、SMI 的深浅、水合物稳定带的厚度及 BSR 之下游离气的厚度等因素。前已述及,马克兰增生楔沉积厚度 7 000 m 以上且水深在 150~1 100 m 的海域存在最低含氧带,这些条件保障了该区具有丰富的有机质来源和良好的有机质保存条件。

据 2007 年“流星号”的调查结果,在马克兰增生楔水深 2 861 m 的水合物站位(5 号)采集到了水合物样品,而在相距约 4 km 水深 2 831 m 站位未采集到水合物样品。通过计算,上述 2 个站位的 SMI 深度分别为 1.3 和 4.7 m^[6]。总体来看,SMI 深度较浅,表明该区甲烷通量高,气源足。

2 号站位的水合物样品大小形状各异,具有特殊的气泡结构(图 4)。片状或板状水合物像硬币大小,直径 3 cm,厚度几厘米,沿沉积物裂隙分布。管状水合物长几厘米,直径 1~2 cm,垂直于层理。具有气泡结构的水合物样品说明,在水合物形成过程中,沉积地层中存在有较多的气体,但只有一部分气体形成了水合物。气泡结构表明气体渗漏很强,单个的气泡被水合物包裹。管状水合物可能指示了气体上升的通道。由此可见,该区天然气水合物气源充足。

另据地震资料处理、反演和综合解释,该区天然气水合物的稳定带厚度较大,中西部稳定带厚度可达 300 m,BSR 之下通常存在 200~250 m 的游离气带^[1],由此可见,该区天然气水合物的气源充足。

5 结论

(1)从北到南,马克兰增生楔的沉积物年龄越来越年轻,逆冲断裂形成的时间越来越晚,断裂活动性越来越强;从西到东,逆冲断裂的活动性具有减弱的趋势。逆冲断层与相关的正断层及泥火山共同为深部气体向上运移提供了通道。

(2)马克兰增生楔沉积厚度大,SMI 界面浅,水合物样品具有气泡结构以及 BSR 之下存在较厚的游离气层等证据表明,该区天然气水合物的气源充足。

(3)马克兰增生楔由西到东、由南往北,BSR 的振幅强度和连续性有逐渐降低的趋势。深海平原 BSR 不连续,其下游离气含量少,而在增生楔的斜坡盆地中,BSR 连续而清楚,其下游离气含量高。由此可见,在马克兰增生楔 BSR 的产状主要受断裂构造的影响。

(4)由于缺少资料,对于该区气源足而水合物饱和度和游离气饱和度较低尚难做出解释。另外,2 个相距很近且水深相近的站位,一个采集到

水合物样品,另一个没有采集到,它们是受沉积作用还是构造作用控制或是受二者共同控制,目前尚不清楚,尚需做进一步的工作。

参考文献:

- [1] Smith G L. The structure, fluid distribution and earthquake potential of the Makran subduction zone, Pakistan [D]. Southampton: Great Britain, University of Southampton, 2013.
- [2] Wyrski K. Oceanographic atlas of the international Indian Ocean expedition [R]. Washington D. C., US: National Science Foundation, 1971: 8-11.
- [3] Von Rad U, Berner U, Delisle G, et al. Gas and fluid venting at the Makran accretionary wedge off Pakistan[J]. Geo-Marine Letters, 2000, 20(1): 10-19.
- [4] Bohrmann, G, Ohling G. Cold Seeps of the Makran Subduction Zone (Continental Margin of Pakistan): R/V Meteor Cruise Report M74/3: M74, Leg 3, Fujairah-Male, 30 October-28 November [R]. 2007, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, 2008: 1-120.
- [5] Smith G L, McNeill L C, Henstock T J, et al. Fluid generation and distribution in the highest sediment input accretionary margin, the Makran [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 403: 131-143.
- [6] Fischer D, Mogollón J M, Strasser M, et al. Subduction zone earthquake as potential trigger of submarine hydrocarbon seepage [J]. Nature Geoscience, 2013, 6(8): 647-651.

FACTORS CONTROLLING GAS HYDRATE ACCUMULATION IN MAKRAN ACCRETIONARY WEDGE OFF PAKISTAN

GONG Jianming^{1,2,3}, LIAO Jing^{1,2,3}, SUN Jing^{1,2,3},
YANG Chuansheng^{1,2,3}, WANG Jianqiang^{1,2,3}, HE Yongjun^{1,2,3},
TIAN Ruicong^{2,3,4}, CHENG Qingsong^{2,3,5}, CHEN Zhiqiang^{2,3,6}

(1 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao, 266071, China;

3 The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, M L R, Qingdao 266071, China;

4 China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

5 College of Resource and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

6 College of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: A large number of documents and references are reviewed for revealing the main controlling factors of gas hydrate accumulation in the Makran accretionary wedge. It is found that the activity of thrust faults in the Makran accretionary wedge is gradually weakened from west to east and from south to north, together with the weakening of the amplitude and continuity of BSR. The occurrence of BSR is obviously controlled by faults. The Makran accretionary wedge is characterized by large thickness, shallow SMI interface, bubble structure of hydrate samples and thick free gas under BSR, indicating that there is sufficient gas source for gas hydrate to form. At the same time, the northward Arabia Plate Subduction at a low angle created a series of E-W aligned and parallel thrust faults and some small normal faults, that may provide migration pathways for deeper natural gas to move upwards. It is then concluded that tectonic action and fault activities are the main controlling factors for gas hydrate to accumulate in the Makran accretionary wedge

Key words: controlling factors; gas hydrate; Makran accretionary wedge; Pakistan