

孟 明, 龚建明, 廖 晶. 马克兰增生楔海陆泥火山气源成因[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(5): 43-48.

马克兰增生楔海陆泥火山气源成因

孟 明^{1,2,3}, 龚建明^{3,4*}, 廖 晶^{3,4}

(1 中国地质调查局中国地质科学院, 北京 100037; 2 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 4 自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛 266071)

摘 要:为了探讨马克兰增生楔海陆泥火山气源成因及其差异,对取自陆上钱达戈普(Chandargup)泥火山口的 5 个水样进行了气体组分及其碳、氢同位素测试。结果显示,陆上泥火山中的气体组分主要为 CH₄ 和 CO₂,其 CH₄ 碳同位素平均值为 -42‰,属热解成因气。对比分析马克兰增生楔海陆沉积地层、断裂分布、地温梯度、有机质含量等资料,认为海域与泥火山有关的生物成因气主要来自于浅表层的 Hinglaj-Ormara 组泥岩,而陆域热解成因气主要来自深部的 Hoshab 组页岩或者更深处泥页岩,推测马克兰增生楔陆域深部地层有一定的油气资源潜力。

关键词:马克兰增生楔;海陆泥火山;钱达戈普;气源成因;沉积地层

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.157

0 引言

地貌上,泥火山像一个锥状沉积体,是由地下深部的高压泥浆和以气体为主的流体携带周围泥土岩屑,沿断层、裂隙、破碎带等高渗透性通道以及地壳薄弱带喷出地表形成^[1-4]。泥火山与典型的火山有着本质区别,典型的火山喷出物来自地壳深部幔源活动的火山岩浆^[5]。而世界上大多数泥火山主要是由沉积作用形成,与大量沉积物快速堆积有关,多形成于油气藏附近。从全球来看,泥火山在海上和陆上均有分布,主要发育在阿尔卑斯山—特提斯带(阿尔卑斯山—黑海—里海—喜马拉雅山)和环太平洋带^[2,6]。大部分泥火山喷出的气体以 CH₄ 为主,并且陆上泥火山喷出的

CH₄ 气体中 76% 为热成因气,仅有 4% 为生物成因气;小部分泥火山以喷出 CO₂ 或 N₂ 为主^[7-9]。研究陆上和海域泥火山有重要意义:①陆上泥火山和油气资源有密切关系,泥火山/泥底辟是 CH₄ 及油气的运移通道,泥火山/泥底辟周缘可能是潜在的油气聚集区,所以开展泥火山的气体成分及其同位素等研究可为寻找有利的油气勘探领域提供有效信息;②泥火山可能提供了深部地质活动的信息;③泥火山喷发会释放出大量 CH₄,CH₄ 的温室效应是 CO₂ 的 20 倍以上,对全球大气中 CH₄ 含量估算以及气候变化有重要的影响^[10]。

本文对取自马克兰陆域钱达戈普泥火山口的 5 个表层水样进行了气体成分、CH₄ 碳氢同位素以及 CO₂ 碳同位素测定,确定了陆域泥火山的气源成因;通过对比马克兰增生楔地层厚度、地温梯度、有机质含量等,探讨海、陆泥火山气源成因差异,对于了解马克兰增生楔油气资源潜力有指示作用。

1 地质背景

马克兰增生楔位于西北印度洋巴基斯坦和伊朗近岸,是由阿拉伯板块以大约 4 cm/a 的速度向

收稿日期:2019-05-15

资助项目:国家自然科学基金“冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用及资源效应”(91858208);中国地质调查项目(DD2019058)

作者简介:孟 明(1995—),女,在读硕士,主要从事地球化学方面的研究工作.E-mail: mengming0809@163.com

* 通讯作者:龚建明(1964—),男,博士,研究员,主要从事海洋油气与水合物研究工作.E-mail: gongjianm@aliyun.com

北部欧亚板块之下俯冲形成的^[11]。马克兰增生楔东西两侧分别由奥奈驰-奈尔(Ornach-Nal)断层和米纳卜(Minab)断层将其与东西大陆分隔开,南北宽达 300 km,东西长约 800 km,最大沉积厚度在 7 000 m 以上^[12]。泥火山在马克兰增生楔陆域及海域分布广泛,陆域泥火山主要集中在巴基斯坦东部的走滑断层附近,海上主要分布在中、上陆坡的背斜脊(图 1)。该区泥火山形成的主要原因是,马克兰增生楔下部地层为较细粒的半远洋泥质地层,上部为具有高速沉积特征的较粗的马克兰砂,这种密度倒置且后期沉积速率很高的分布特征为泥火山/泥底辟的形成提供了物质基础^[13],这也正符合泥火山形成的条件。

马克兰增生楔陆域渐新世以来地层格架为一套深海浊积岩—深水相泥岩—滨浅海相砂泥岩沉积序列。马克兰增生楔海域新生界可划分为 3 个地层层序:最上部层序整体呈楔状,为泥质沉积;中部层序为一套背驮式沉积,推测为粉砂质沉积;

底部层序可以进一步划分为上部的马克兰砂和下部的喜马拉雅泥质沉积物,发育泥底辟构造^[14],海陆域沉积差异与海岸线南移和水流速率有一定关系。

马克兰增生楔处于三大板块交汇处。除了受阿拉伯板块向欧亚板块之下的俯冲挤压以外,还受到印度板块和欧亚板块之间构造边界 Chamman/Ornach-Nal 走滑断层的影响。钱达戈普泥火山地处欧亚板块、印度板块和阿拉伯板块汇聚区,即欧亚板块和印度板块交界处 Oranch-nal 断层西侧,与海上 Malan 泥火山岛屿距离较近,构造挤压和走滑活动剧烈,因此泥火山发育。钱达戈普泥火山沿 Dhak 背斜脊分布,其构造核心部位通常为泥浆喷出口。本次采样的泥火山便是马克兰陆域最大的泥火山——钱达戈普泥火山,距海岸线约 4 000 m,直径约 18 m,火山坑中充满黏性泥浆,喷出物可见来自早白垩世到现今的微体古生物化石^[15](图 1)。

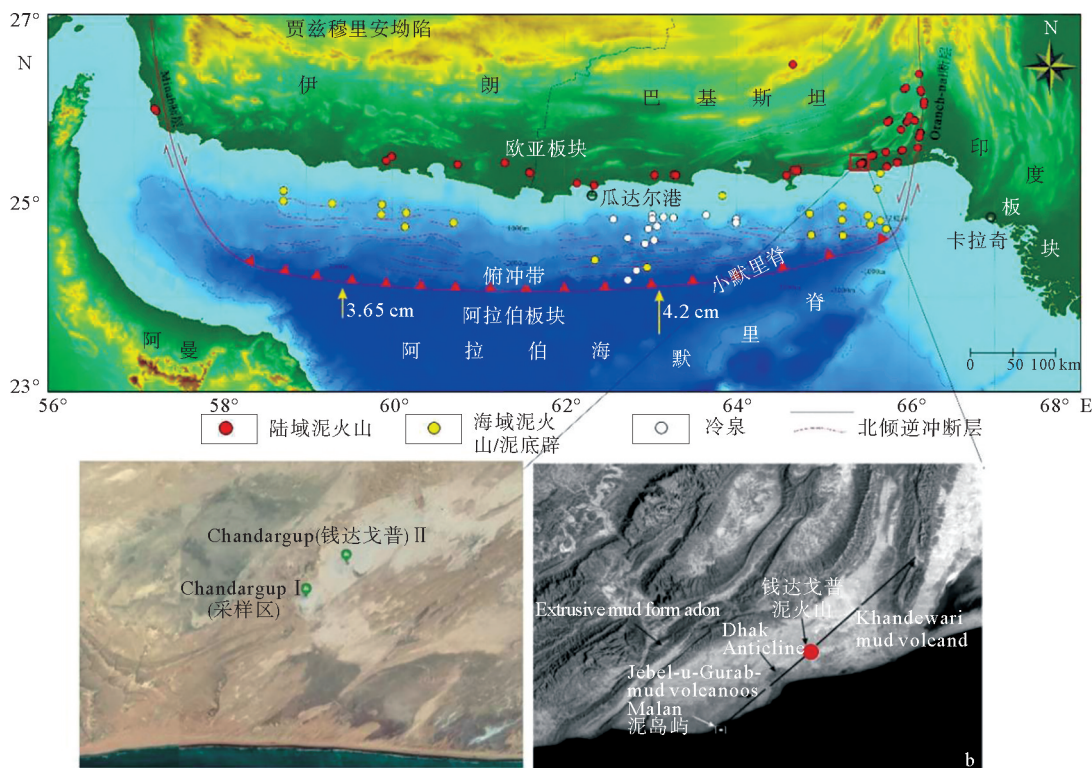


图 1 马克兰增生楔大地构造位置、泥火山分布和采样区位置图(据文献[13,15])

Fig.1 Location map of Makran accretionary wedge showing tectonic location, mud volcano distribution and sampling areas (after references [13,15])

2 陆上泥火山气源成因

采集自钱达戈普泥火山口的水样有 5 个,编号分别为 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5,此泥火山喷口有微弱气泡冒出。测试结果显示:5 个水样中泥火山喷出的气体成分主要是 CH_4 和 CO_2 ,其中, CH_4 平均含量 39%,相对较低。对 CH_4 的 C、H

同位素和 CO_2 的 C 同位素进行测试分析, CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-45.95\text{‰} \sim -37.44\text{‰}$, δD 变化范围为 $-289\text{‰} \sim -249\text{‰}$, CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值(表 1)。本次采样泥火山的形状和活动程度在过去的 160 年里几乎没有发生大的变化,属于静止期的稳定泥火山,泥火山口甲烷持续少量排放,每天略有波动^[16]。

表 1 泥火山水样中气体组分及 C、H 同位素测试结果

Table 1 Gas content and C and H isotopes from water samples of mud volcano

样品编号	$\text{CH}_4/\%$	$\text{CO}_2/\%$	$\text{CH}_4/\%$ 相对含量	$\text{CO}_2/\%$ 相对含量	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4/\text{‰}$	$\delta\text{D}-\text{CH}_4/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2/\text{‰}$
1-1	*	*	*	*	*	*	-0.17
1-2	0.06	0.30	17	83	*	*	-4.78
1-3	0.57	0.29	66	34	-44.12	-289	-1.48
1-4	0.20	0.23	47	53	-37.44	-249	-0.62
1-5	0.12	0.34	26	74	-45.95	-264	-1.89

众所周知,烃类气体主要有 2 种成因:微生物成因和热解成因。一般来说, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 < -60\text{‰}$ 指示甲烷气体为微生物成因, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 > -50\text{‰}$ 为热成因,介于两者之间为混合成因^[17]。甲烷的 δD 可进一步判别微生物成因方式, CO_2 还原形成的甲烷的 δD 值通常 $> -250\text{‰}$ (SMOW 标准),醋酸发酵形成的甲烷的 δD 值通常 $< -250\text{‰}$,一般为 $-355\text{‰} \sim -290\text{‰}$ 。分析本次所取水样中 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 δD 值可以发现,其大致位于热成因区域(图 2),推测主要以热解成因甲烷为主。

3 海、陆泥火山气源成因探讨

海域环境下泥火山/泥底辟与海底天然气水合物密切相关,水合物所在区域属于海底不稳定沉积物源区,将会增强含流体泥浆的运移,即沉积物上升到达地面的过程中,天然气水合物分解释放的甲烷会降低沉积物的平均密度,进一步驱动泥浆向上运移。马克兰近岸所有的泥火山和泥质岛屿,其泥浆喷发与易燃的甲烷气体排放有关^[18]。

前已述及,马克兰增生楔海域沉积地层由 6 000~7 000 m 以上的深海浊流沉积物组成,基于地震反射特征,可将海域新生界划分为层序 III 和层序 II 和 I 3 个反射层序(表 2)^[14,19]。层序 III 由渐新世一中中新世半深海浊流沉积物构成,对应马克兰陆域的 Hoshab 页岩和 Panjgur 砂岩;上覆于层序 III 之上的层序 I 和 II 地层厚度约 2 000 m 以上,包含有中新世以来因马克兰增生楔堆积而形成的一套混合浊积岩,对应陆域晚中新世 Parkini 组和更年轻的地层。层序 I 和 II 沉积期间,沉积速率很高,达 185 m/Ma,高沉积速率容易诱发泥火山/泥底辟^[14,19]。马克兰海域表层海水初级生产力高且有机质保存条件良好,因此高含量有机

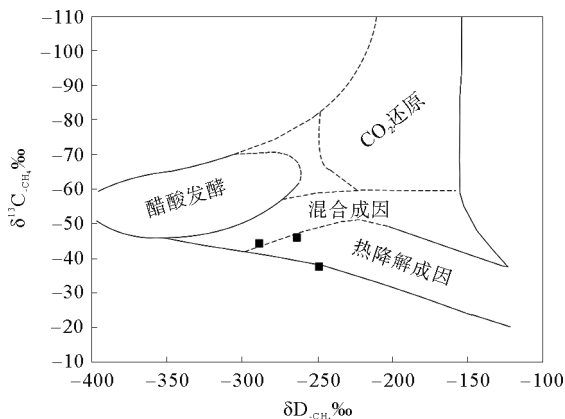


图 2 泥火山水样中 CH_4 气体 C、H 同位素测试投点图

Fig.2 Map of C and H isotopes of methane from the water samples of mud volcano

质埋藏于马克兰边缘快速沉积的(>0.2 m/ka)斜坡沉积物中,特别是在 OMZ(最小含氧区, $\text{TOC}>1\%$)^[20-21]。埋藏的有机质是形成甲烷气体的来源,在有利的温、压条件下,甲烷可形成天然气水合物。马克兰增生楔深部泥浆不稳定,而且含气量高,因此高含气量驱动泥浆上涌形成 Malan 泥火山岛屿,在此泥火山岛屿获取的喷出气体样品中甲烷含量占 97.6%,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值约 -59.4% ,表明主要为生物成因甲烷,混合少量重烃组分^[15-16]。生物成因甲烷大多由 CO_2 还原产生, CO_2 通常由原地有机质氧化分解形成,之后由微生物还原作用生成甲烷,因此,天然气水合物中的这种气体通常来源于附近的沉积地层^[17]。

生物成因甲烷气在地层温度高于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 后易被热解成因烃类气体所取代^[22],马克兰海域地层的温度梯度为 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[23],也就是说生物成因气体大致产生于海底之下 2 000 m 的浅层范围内。海域大约 2 000 m 厚度对应中新世以来沉积于马克兰增生楔的混合浊积岩,同时对应于陆上晚中新世 Parkini 组和 Hinglaj-Ormara 组更年轻的地层^[19]。Parkini 组由于反射振幅大于上覆地层,推测为粉砂质沉积,Hinglaj-Ormara 组在海域为泥质沉积,并且有机质含量较高^[14],综合岩性和有机质赋存情况,认为马克兰增生楔海域与泥火山有关的生物成因甲烷主要来自于浅表层的 Hinglaj-Ormara 组泥岩。

表 2 增生楔海域和陆域地层、岩性、地温梯度、TOC 含量等分布

Table 2 The stratigraphic distribution of strata, lithology, geothermal gradient and TOC content in the onshore and offshore Makran accretionary wedge

年代	海域地层	岩性	地层厚度/km	地温梯度/ $^\circ\text{C}$	TOC/%
中新世以来层序 I 和 II	Hinglaj-Ormara 组	泥岩	>2	25	>1 (OMZ)
	Parkini 组	粉砂质沉积			
渐新世-中中新世层序 III	Panjgur 组	上部砂、下部			
	Hoshab 组	泥质沉积			
年代	陆域地层	岩性	地层厚度/km	地温梯度/ $^\circ\text{C}$	TOC/%
上新世-更新世	Chitti/Ormara 组	细粉砂岩	2-3	25	
上新世	Talar/Hinglaj 组	浅灰色泥岩			
晚中新世	Parkini 组	泥岩	1		0.64
	Panjgur 组	砂岩	>2		
渐新世-中中新世	Hoshab 组	页岩			0.54

马克兰陆上增生楔由几千米厚的东西向展布的白垩纪至现代的沉积岩石构成,从俯冲带向内陆延伸 300 km^[24-25]。马克兰近岸最古老的岩石是渐新世一中中新世期间沉积的 Hoshab 组深灰色页岩^[24];Hoshab 页岩上覆岩石为 2 000 m 厚的 Panjgur 组砂岩、深水扇复合体和浊流沉积物,再向上便是大约 1 000 m 厚的晚中新世 Parkini 组块状斜坡泥岩;晚中新世一早上新世期间,伴随着俯冲相关的挤压构造运动,上新世 Talar/Hinglaj 组砂页岩以及上新世一更新世 Chitti 和 Ormara 组沉积过程中经历了一个陆架、斜坡和海岸平原进积的阶段^[25]。我们采集到的马克兰增生楔陆上泥火山水样中的 CH_4 是热解成因气。热

成因甲烷是由于酪根在温度超过 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时经热降解作用形成^[17]。通过微体古生物学研究,Delisle 等^[15]认为泥火山上涌喷发的通道很可能达到地下 2 000~3 000 m 深度,进入中新世 Parkini 组, Parkini 组块状斜坡泥岩厚度大约 1 000 m,其下 Panjgur 组砂岩、深水扇复合体和浊流沉积物厚度超过 2 000 m^[25],所以推测马克兰近岸渐新世一中中新世期间沉积的 Hoshab 组深灰色页岩埋藏深度应 $>5\text{ }000$ m,马克兰增生楔地温梯度为 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[23],Hoshab 组页岩所处的温度至少高于 $125\text{ }^\circ\text{C}$,达到热成因甲烷生成的温度要求,因此 Hoshab 组页岩可能是陆上泥火山热成因甲烷气体的烃源岩。采样区泥火山沿主要断裂和构造脊

(Dhak 背斜)分布,断裂通道发育,有助于深部气体沿通道上涌至地面。泥火山喷发的气体中 $\delta^{13}\text{C}_{-\text{CO}_2}$ 值正异常源于泥火山系统内的某种作用,Etiope 等^[26]认为在泥火山气体运移过程中,厌氧微生物降解原油或重烃类生成 CO_2 , CO_2 在微生物作用下发生还原反应生成甲烷,致使剩余的 CO_2 富含重同位素, CO_2 发生还原作用生成的 CH_4 富轻同位素。此次所有样品 $\delta^{13}\text{C}_{-\text{CO}_2}$ 值均为负值,变化范围为 $-4.78\text{‰} \sim -0.17\text{‰}$,未出现明显的正异常,说明热解成因气在上升过程中几乎没有 CO_2 还原生成的 CH_4 气体的参与。

马克兰陆上钻井岩心样品表明,其拥有足够的有机碳形成烃类物质,并且增生楔下部沉积物的急速埋藏有利于厌氧环境形成。Khan 等^[27]分析了来自于增生楔各地层的 10 个样品的总有机碳(TOC)含量,3 个 Hoshab 组页岩样品 TOC 含量平均值为 0.54% ; 4 个 Parkini 组泥岩样品 TOC 含量平均值为 0.64% (表 2)。虽然 Parkini 组泥岩样品 TOC 含量较 Hoshab 组页岩样品 TOC 含量高,但由于埋藏较浅,达不到热解成因气生成的温度门限,所以,热解成因气更有可能来自 Hoshab 组页岩或者更深层位富含有机质的地层。

4 结论

(1)马克兰增生楔陆域泥火山水样气体成分主要是 CH_4 和 CO_2 , CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-45.95\text{‰} \sim -37.44\text{‰}$, CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值,表明其主要为热解成因气体,混有少量生物成因气。

(2)对马克兰增生楔海域和陆域地层分布、岩性、厚度、有机质含量、地温梯度等进行综合分析,认为海域泥火山中的生物成因气主要来自于浅表层的 Hinglaj-Ormara 组泥岩;而陆上泥火山中的热解成因气主要来自深部的 Hoshab 组页岩或者更深的地层。

(3)马克兰陆上泥火山气体显示为热解成因气,相对于表层生物成因气体来说,其深部天然气资源潜力较大。

参考文献:

[1] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud vol-

canoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1):29-42.

- [2] Kopf A J. Significance of mud volcanism [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2):1-52.
- [3] 刘嘉麒. 大地“沸腾”——泥火山[J]. *大自然探索*, 2003, (8):8-9.
- [4] 黄华谷, 邸鹏飞, 陈多福. 泥火山的全球分布和研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(2):189-197.
- [5] 何家雄, 翁荣南, 祝有海, 等. 台湾南部泥火山及伴生气地质地球化学特征及其油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 319-326.
- [6] Sun C H, Chang S C, Kuo C L, et al. Origins of Taiwan's mud volcanoes: Evidence from geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 105-116.
- [7] Dimitrov L I. Mud volcanoes-The most important pathway for degassing deeply buried sediments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1-4):49-76.
- [8] Etiope G, Milkov A V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere [J]. *Environmental Geology*, 2004, 46(8): 997-1002.
- [9] Etiope G, Fezullayev A, Baciuc C L. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(3):333-344.
- [10] Shindell D T, Faluvegi G, Koch D M, et al. Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions [J]. *Science*, 2009, 326(5953):716-718.
- [11] Demets C, Gordon R G, Argus D F. Geologically current plate motions [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(1): 1-80.
- [12] Smith G L. The structure, fluid distribution and earthquake potential of the Makran Subduction Zone, Pakistan [D]. Southampton: University of Southampton, 2013.
- [13] 龚建明, 廖晶, 张莉, 等. 印度洋北部马克兰增生楔泥火山分布及主控因素探讨[J]. *现代地质*, 2018, 32(5): 1025-1030.
- [14] 廖晶, 龚建明, 何拥军, 等. 马克兰增生楔地层层序及发育过程[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(4): 69-72.
- [15] Delisle G, Rad U V, Andruleit H, et al. Active mud volcanoes on and offshore eastern Makran, Pakistan [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(1):93-110.
- [16] Delisle G. The mud volcanoes of Pakistan [J]. *Environmental Geology*, 2004, 46(8):1024-1029.
- [17] 赵祖斌, 杨木壮, 沙志彬. 天然气水合物气体成因及其来源[J]. *海洋地质前沿*, 2001, 17(7):38-41.
- [18] Abbasi I A, Kakar D M, Khan M A, et al. Mud volcanoes in an active fore-arc setting: a case study from the makran coastal belt, SW Pakistan [M] // *Tsunamis and Earthquakes in Coastal Environments*. 2016.

- [19] Schlüter H U, Prexl A, Gaedicke C, et al. The Makran accretionary wedge: sediment thicknesses and ages and the origin of mud volcanoes [J]. *Marine Geology*, 2002, 185(3):219-232.
- [20] Rad U V, Schulz H, Khan A A, et al. Sampling the oxygen minimum zone off Pakistan; glacial-interglacial variations of anoxia and productivity (preliminary results, sonne 90 cruise)[J]. 1995, 125(1/2):7-19.
- [21] Rad U V, 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.
- [22] 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.
- [23] Smith G L, Mcneill L C, Wang K, et al. Thermal structure and megathrust seismogenic potential of the Makran subduction zone [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(8):1528-1533.
- [24] Harms J C, Chapel H N, Francis D C. The Makran coast of Pakistan; its stratigraphy and hydrocarbon potential[C] // Haq B U, Milliman J D. *Marine geology and oceanography of Arabian Sea and Coastal Pakistan*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1984:3-26.
- [25] Kazmi A H, Abbasi I A. Stratigraphy and historical geology of Pakistan [R]. Department and NCE in Geology, University of Peshawar, Pakistan, 2008:551.
- [26] Etiope G, Feyzullayev A, Milkov A V, et al. Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(9):1692-1703.
- [27] Khan M A, Raza H A, Alam S. Petroleum geology of the Makran region: implications for hydrocarbon occurrence in cool basins [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2010, 14(1):5-18.

DIFFERENCE IN GAS SOURCES FOR OFFSHORE AND ONSHORE MUD VOLCANOES IN MAKRAN ACCRETIONARY WEDGE

MENG Ming^{1,2,3}, GONG Jianming^{3,4*}, LIAO Jing^{3,4}

(1 China Geological Survey, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

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

3 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

4 Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to investigate the origin of mud volcanic gas source in Chandargup area of the Makran accretionary wedge and the differences between onshore and offshore mud volcanic gas sources, the gas composition and carbon and hydrogen isotopes of five water samples from onshore mud volcanic crater were tested. The results show that the gas components in the onshore mud volcano are mainly composed of methane and carbon dioxide, and the average carbon isotope of methane is -42% , indicating an origin of thermogenic gas. By collecting the data of sedimentary strata, fault distribution, geothermal gradient and organic matter content onshore and offshore of the Makran accretionary wedge, it is concluded that the biogenic gas related to offshore mud volcanoes mainly comes from shallow Hinglaj-Ormara mudstone, while the onshore thermogenic gas mainly from deep Hoshab shale or deeper mudstone and shale, indicating that there is a potential for oil and gas resources in the deep strata of the onshore Makran accretionary wedge.

Key words: Makran accretionary wedge; offshore and onshore mud volcanoes; Chandargup area; gas source; sedimentary strata