

孙运宝, 蔡峰, 李清, 等. 海洋浅表层天然气水合物资源评价[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 87-93.

海洋浅表层天然气水合物资源评价

孙运宝^{1,2}, 蔡峰^{1,2}, 李清^{1,2}, 闫桂京¹, 梁杰^{1,2}, 董刚¹, 骆迪¹, 李昂¹, 王星星¹, 钟伟杰³

(1 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术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 266071; 3 山东省煤田地质规划勘察研究院, 济南 250104)

摘要: 浅表层天然气水合物具有埋藏浅、厚度大、纯度高等特点。现有的评价方法多针对于具有明显 BSR 反射特征的中深层天然气水合物, 而对浅表层天然气水合物的相关研究鲜有发表。本研究通过对国内外浅表层水合物发育区广泛调研, 以浅表层水合物的形成机理为基础, 探究水合物资源评价方法的选择; 以水合物空间展布规律为参考, 明确评价范围界定条件; 以综合指示特征为参考, 分析评价参数的选取依据。并在此基础上, 与中深层天然气水合物进行对比, 提出浅表层天然气水合物资源刻度区选取及解剖的初步建议, 引出评价中存在的问题, 梳理出浅表层天然气水合物的资源评价方法的关键问题。

关键词: 浅表层天然气水合物; 刻度区; 资源评价; 数值模拟

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.061

0 引言

海洋浅表层天然气水合物是指低温、高压、高甲烷通量条件下形成的, 分布于海底 100 m 以浅(可出露海底), 主要由渗漏系统形成的天然气水合物矿藏, 具有分布集中、埋藏浅、饱和度高(40%~100%)等特点^[1-2]。目前, 在黑海、里海、挪威海、地中海、加的斯湾、日本海、南海海槽、鄂霍次克海及我国海域均已发现浅表层天然气水合物^[3-13]。海洋浅表层水合物在有限区域内的高浓度富集, 使其可作为重要的可替代能源^[6-9]; 与之相关的快速流体运动可引起的沉积物变形, 易造成海底工程隐患^[10]; 而高甲烷通量背景导致的温室气体扩散, 可对环境和气候造成不可逆的影响^[11-13]。

国际上对海洋天然气水合物资源评价的主流评价方法是体积法, 该方法通过结合地质、地球物理及地球化学等多学科手段, 获取评价区的水合物

分布面积、厚度、孔隙度、饱和度及产气因子等参数, 通过蒙特卡洛法估算天然气水合物的资源潜力。对于中深层、大面积连续分布的、扩散型水合物, 体积法是适用的, 因为其参数可直接通过有效的数据处理及解释技术得到。但针对浅表层天然气水合物却具有很大的局限性^[14], 主要体现在: ①浅表层天然气水合物没有明显的地震反射特征(如似海底反射等), 常规采集手段及处理技术难以获取高精度速度资料, 因而难以确定其垂向分布; ②浅表层水合物常与泥火山、麻坑、泥底辟等渗漏构造伴生, 分布范围局限(多 $<1\text{ km}^2$), 因而其横向展布状态难以判定; ③受高流体通量控制, 水合物分布特征具有多样性, 既可能呈环带状分布、柱状分布、沿断裂分布还可能呈多层分布, 无论何种形式均不能采用体积法简单描述; ④渗漏构造内部结构复杂, 不同的渗漏构造形成机理不同, 运移和封堵机制也具有显著差异, 因而对沉积物的孔隙度、饱和度及渗透率等物性参数评价也不能采用统一的标准, 即使是统一渗漏构造, 各物性参数也具有明显的非均质性。因而亟需寻找一种更具有针对性的方法用于海洋浅表层天然气水合物资源评价。对海洋浅表层天然气水合物资源评价问题的研究既是水合物理论的重要组成部分, 又是有效指导水合物勘探活

收稿日期: 2020-05-28

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFC0310001); 山东省自然科学基金(ZR201807100270)

作者简介: 孙运宝(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事天然气水合物资源评价方向的研究工作。E-mail: yunbaos@sina.com

动的关键所在。

本研究拟以浅表层水合物的形成机理为基础,以多学科综合识别指征为依据,遵循水合物空间展布规律,梳理出适用于浅表层天然气水合物的资源评价方法思路,提出浅表层天然气水合物资源刻度区选取及解剖的初步建议,引出浅表层天然气水合物资源评价需注意的关键问题。

1 评价内容

2017年11月,国务院正式批准将天然气水合物列为我国第173个新矿种,正式确定了天然气水合物的矿产资源属性。对天然气水合物资源的评价,实质上是对天然气水合物成藏系统的评价,是综合考虑天然气水合物在地质演化过程中动态生成和聚集的各种物理化学过程,进而计算的固体水合物含气量、伴生游离气量及层间水中所含溶解气量的总和。

在评价目标上,海洋浅表层天然气水合物资源评价目标与常规石油系统和深层水合物资源评价相同,都是为了提高对水合物浓度的勘探,进而确定天然气的商业来源;在评价内容上,与中深层水合物资源类似,既需要对在一定程度上能够聚集成为资源的水合物及其伴生气进行评价,还需要对系统成藏的关键要素,如温压条件、气源条件、输导条件和储集条件,及其它它们之间的最佳匹配关系进行评价^[15-16],评价过程中假设天然气水合物中圈闭的天然气全部是甲烷,并不考虑产生状态的差异(图1)。

考虑到浅表层水合物与渗漏构造的高度相关性,本文认为浅表层资源评价内容应依据浅表层水合物形成机理,在分析天然气水合物系统成藏要素基础上,重点对分布于近海底的泥火山型水合物(与泥火山、底辟、气烟囱和麻坑等构造相关的水合物类型)^[6,17-19]和裂隙型水合物(与断裂构造相关的水合物类型)^[9,20]进行评价。

2 评价单元划分

浅表层天然气水合物评价单元划分与中深层水合物明显不同。中深层水合物可通过识别水合物稳定域内的地质、地球物理及地球化学异常来圈

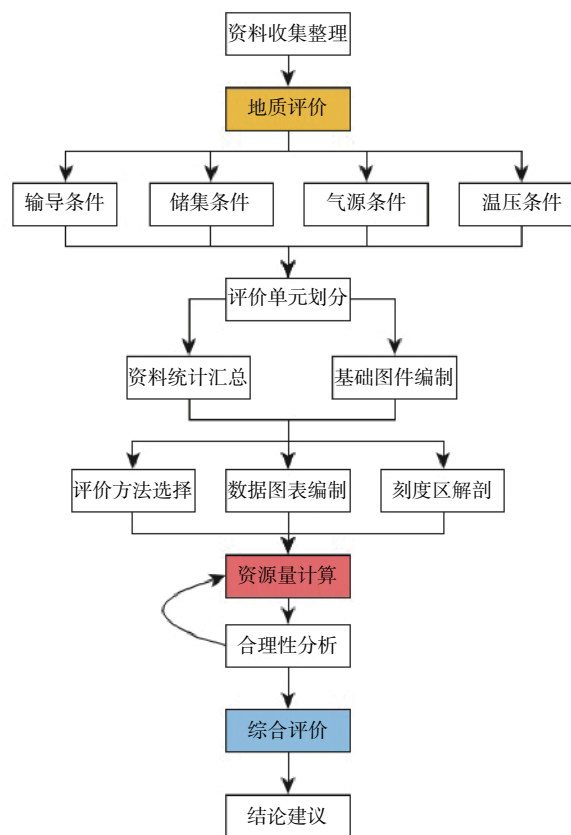


图1 资源评价技术路线

Fig.1 Flow chart of marine hydrate resource evaluation

定和划分评价单元,有据可依,而浅表层水合物通常没有明显的地球物理指示标志,声学特征模糊,地球化学数据有限。因此浅表层天然气水合物资源评价应结合实际勘查情况,做好基础地质条件评价,充分利用多波束数据和浅地层剖面资料,提取相关渗漏地质构造参数及其时空分布,进而确定评价单元划分依据。浅表层天然气水合物评价单元划分总体原则为“优聚兼散”,即优选渗漏构造聚集区,兼顾渗漏构造零散分布区;优选多类数据异常集中区,兼顾单一手段异常区。平面划分时,遵守浅表层水合物生成和聚集的客观规律,以储层展布规律确定范围;纵向划分时,根据地球物理资料、多波束数据、地球化学数据、热流数据及取样数据覆盖及研究程度,开展数值模拟研究,确定评价单元的顶底界。本文以泥火山型天然气水合物为例,探讨海洋浅表层天然气水合物资源评价方法。

3 评价方法及参数

天然气水合物资源量评价方法的选择决定了

资源评价的工作质量和预测精度。国际上用于浅表层水合物资源评价的方法主要可分为 3 类, 体积法、类比法和成因法。

3.1 体积法

体积法直接从储集层的有效储集空间入手, 不考虑烃源岩, 用数理统计的方法建立圈闭水合物资源量与单位体积油气资源密度和体积变量的关系, 然后加总求和得到地质资源量, 其主要公式为:

$$Q = A \times z \times c \times G$$

式中: A 为天然气水合物存在带面积;

z 为水合物存在带厚度;

c 为水合物浓度;

G 为水合物产气因子。

面积: 浅表层天然气水合物与中深层天然气水合物不同, 通常难以识别常见的 BSR 反射, 因而不能仅依靠 BSR 来圈定其分布范围, 其分布面积常与含烃流体沿渗漏通道向海底流动过程中向围岩扩散-分离的范围有关^[21], 一般不超过 1 km^2 。从稳定域分布来看, 喷口处一般流体通量大、热流量高, 不利于水合物保存, 故主通道处的泥火山型天然气水合物厚度一般较小, 主通道附近水合物呈环带状连续分布, 如 Wood 等^[22] 基于 Bullseve 渗漏系统研究建立的气烟囱模型和 Paganoni 等^[23] 基于 Sabah 海域发现建立的流体管道模型, 此时的水合物分布面积一般通过预测渗漏构造的分布范围推断算。而一些学者通过可控源电磁勘探发现, 渗漏喷口附近可能比周围地区具有更多的水合物, 并提出了水合物在冷泉通道^[24] 和麻坑下部^[25] 富集的柱状模型, 认为水合物分布面积即主通道面积。

厚度: 浅表层天然气水合物常出露海底, 因而, 一般认为浅表层天然气水合物厚度即稳定带厚度^[26]。然而, 北美卡斯卡迪亚边缘的钻探计划^[27] 和黑海 Kerch 渗漏区取样^[13] 的结果显示, 稳定带内可以存在多个深度形成含水合物的区域, 此时厚度的计算需借助更高精度的速度分析和电阻率数据处理。

浓度: 浓度为孔隙度和饱和度的乘积。浅表层水合物浓度可通过目视观测、无机地球化学数据、地球物理(例如电阻率)数据和现场天然气浓度直接测量进行估算。浅表层水合物浓度变化很大, 从

百分之几(分散状)到几乎 100%(脉状或块状)^[28]。

随着全球海洋浅表层天然气水合物数据库的丰富和各种数值模拟模型的开发, 基于网格模型的蒙特卡洛法已成为运用体积法进行水合物资源评价的趋势^[28]。

3.2 成因法

成因法通过盆地分析, 建立地质过程的概念模型或地质模型, 抽提其中最主要的作用变化控制因素, 使用数学方法将原因变量与结果数据联系起来, 构建地质过程的数学模型, 对盆地地质过程进行恢复计算、结果预测或研究分析, 最终得出可靠准确的定量地质结论。评价结果主要依赖于对生烃、运移和聚集等主要石油地质问题的全面理解以及对地球化学参数的正确选取。Wallmann 等^[29] 提出了富甲烷流体的渗漏相关的水合物聚集模型, 可基于沉积速率、有机碳含量和稳定域分布计算压实作用对水合物资源量影响; Pinero 等^[30] 提出了高甲烷通量下水合物形成的传递函数, 可定量区分生物甲烷生成和流体活动对天然气水合物聚集的影响; Zhostkov 等^[31] 提出了与海底泥火山相关的天然气水合物的聚集模型, 可根据深度和时间来预测天然气水合物饱和度的演变。由美国斯伦贝谢公司开发的 Petro-Mod 软件, 可实现甲烷水合物三维数值模拟^[32], 能够预测天然气水合物稳定场的空间分布和时间演化, 热成因和生物成因甲烷气的生成和运移, 以及作为天然气水合物的聚集。

3.3 类比法

类比法是利用已知水合物刻度区的单位面积水合物资源丰度, 类比确定评价区单位面积天然气水合物丰度, 然后估算整个评价区天然气水合物资源量的方法。计算公式:

$$Q = A \times \alpha \times P_k$$

式中: Q 为评价区水合物资源量的概率分布, 10^8 m^3 ;

A 为评价单元面积, km^2 ;

α 为相似系数;

P_k 为刻度区水合物资源丰度的概率分布, 10^8 m^3 。

刻度区需遵循“三高”原则, 即高勘探程度、高地质规律认识程度及高资源潜力, 评价指标必须有据可依, 参数合理, 数据可靠, 浅表层水合物评价指

标应从天然气水合物成藏动力学角度分析,至少包括气源条件、输导条件和储集条件3个方面(表1)。

表1 浅表层天然气水合物刻度区地质评价参数
Table 1 Geological evaluation parameters for shallow gas hydrate calibrated unit

参数类型	参数名称	参数类型	参数名称
气源条件	有机质类型	储集条件	沉积速率
	有机质丰度(TOC)		砂泥比
	天然气类型		盐度
	供烃方式		地温梯度
	甲烷通量		稳定带底界
	岩性		GH厚度
	地层温度		SMI深度
输导条件	地层压力		沉积相类型
	通道位置		孔隙度
	通道类型		饱和度
	运移方式		渗透率
	运移距离		储集空间类型

4 讨论

4.1 评价标准

评价标准的建立需综合考虑对地质认识的理解程度、技术方法的掌握程度和油气价格的变动情况,尽管目前国际上尚未建立可行的海洋浅表层天然气水合物资源评价分类行业标准,但就目前勘查及研究程度,可参考现行海域天然气水合物资源评价标准。USGS根据研究区水合物的地质可靠程度和经济可行性对不同水合物资源量分类,制定了水合物资源量/储量分类标准^[33]。本文基于最简原则,建议针对不同的浅表层天然气水合物评价目标(泥

火山型水合物和裂隙型水合物)分别建立更细化的技术评价标准。此外,随着水合物产业化的推进,生态环境评价、经济评价和风险评价也应提上日程,本文在此不做讨论。

4.2 评价要点

4.2.1 立足浅表层水合物自身特点

由于浅表层天然气水合物独特的形成机制,其评价不但与常规油气明显不同,与中深层扩散型水合物也有所差异(表2),如:①常规油气系统所处的沉积环境会随时间变化,因此热史研究对于常规油气的生成,运移和圈闭可能至关重要,天然气水合物是一种更现代的现象,因而盆地的热史对水合物的重要性远不如常规油气重要;②常规油气系统中必须具有明确的烃源岩,而水合物评价仅需明确气体来源即可,但由于在水合物稳定带内部产生的微生物甲烷不足以解释水合物富集区的气体含量,因此需要外部气源,这些来源既可能是生物气源也可能是热解气源,且浅表层水合物对甲烷通量的依赖程度远大于中深层水合物;③对油气运移史的研究是常规油气系统分析的重要组成部分,这是由于油气富集的条件以及富集过程本身可以在盆地历史的早期就开始,一旦形成了油气藏,便会进入相对稳定的状态,而水合物系统取决于现有沉积物和气体通量的供应,对大型古迁移系统的研究意义不大;④渗漏现象与水合物形成关系密切,其特征识别及分布规律研究是水合物评价的重要内容,对于浅表层水合物来说,渗漏构造更是重点评价目标,但在常规油气系统评价中仅将其作为油气指示^[34]。因而在宏观上,资源评价过程应更注重不同类型浅表层水合物形成的地域局限性和聚集时效。

表2 海洋浅表层天然气水合物与常规油气及中深层水合物资源评价对比

Table 2 Comparison of resources evaluation among shallow gas hydrate, medium-deep gas hydrate and the conventional oil and gas

	常规油气资源	海洋天然气水合物资源	
		浅表层水合物	中深层水合物
分布特征	离散型,有明显圈闭界限	离散型,无明显圈闭界限	连续型,无明显圈闭界限
构造位置	背斜等正向构造	渗漏构造区	斜坡为主
聚集机制	浮力运聚为主	渗漏为主、温压条件	扩散为主、温压条件
源储关系	源储分离	源储分离	源储分离/源储一体
勘探目标	有利圈闭	甜点区	甜点区
目标深度	深部	浅部:一般不超过100 mbsf, 50 mbsf左右	浅部:一般不超过600 mbsf, 200 mbsf左右
评价重点	生、储、盖、圈、运、保及匹配关系	温压条件、气源条件、输导条件、储集条件及匹配关系	

4.2.2 加强多学科协作评价

尽管浅表层水合物已在多个海域取得样品, 但以此类矿藏为目标的钻探成果仍然有限, 收集的样品多来自于重力取样(大多不足 6 m), 相关渗漏构造内部流体的扰动导致地震数据分析失效, 难以确定精确参数, 单一手段的资源评价方法得到的结果具有很大的不确定性, 因而基于多学科协作, 采用多种方法同时进行资源量计算对浅表层水合物资源量进行评价变得极为必要。应用于墨西哥湾北部基于钻井数据统计的蒙特卡洛评价技术^[27]、温哥华外海基于可控源电磁技术的剪切模量水合物和游离气分离预测技术^[24]、日本海郁龙盆地基于三维叠前数据的储层参数体预测技术^[35]、地中海东部基于地球化学和地球物理分析的气态和溶解态甲烷总量预测技术^[36]以及基于商业软件 PetroMod 的三维数值模拟技术等均已被用于浅表层水合物资源评价。通过采用多种评价方法, 对资源评价结果进行加权的特尔菲法汇总, 得到的结果具有更高的可信度。

4.2.3 深挖资源潜力

浅表层水合物由于与渗漏构造密切相关, 因而对泥火山构造(包括泥底辟、泥火山、气烟囱、麻坑等)和断裂构造形成机理的揭示变得极为重要。相对于中深层天然气水合物, 浅表层水合物沉积物非均质性更强、温压环境更不稳定、空间分布也更为复杂。受高通量甲烷影响, 浅表层水合物无论在气源分析、输导体系识别方面, 还是在储集特征预测方面, 均难以用特定的识别特征或简单的数值关系描述。数值模拟应贯穿于整个浅表层水合物成藏系统评价始终, 即: ①气源评价应既包括来源于原地生成、水合物循环或深部产生的生物成因气评价, 还包括来源于深部储层(如卡迪斯火山区^[7])、岩浆流体(如日本海^[37])或俯冲相关(如熊野火山区^[38])的热成因气评价; ②输导体系评价应既包括沉积压实作用评价^[39]、地质应力(如台湾泥火山区^[40])评价, 还应包括流体流动影响评价^[41]; ③储层参数评价应既应包括稳定域(如卡迪斯湾^[42])、孔隙度、饱和度及渗透率评价, 还应包括渗漏活动性评价^[43]。只有将室外数据(地质、地球物理、地化调查及钻探取样)与室内分析(实验模拟和数值模拟)充分结合加以利用才可真正达到摸清水合物资源潜力的目的。

5 结论

通过对国内外已发现浅表层水合物海域的调研, 总结了浅表层水合物资源评价的方法及参数, 提出了浅表层天然气水合物资源评价体系框架。

认为浅表层天然气水合物资源评价应立足于其自身特点, 以形成机理为基础, 加强多学科协作, 通过对影响浅表层水合物形成的气源条件、输导条件和储集条件的各种因素开展数值模拟研究, 深挖资源潜力。

参考文献:

- [1] 蔡峰, 闫桂京, 梁杰, 等. 大陆边缘特殊地质体与水合物形成的关系[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 11-15.
- [2] 李清, 王家生, 蔡峰, 等. 天然气水合物系统多幕次甲烷渗漏作用的底栖有孔虫同位素响应——以IODP311航次为例[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 29-36.
- [3] Liang J Q, Zhang W, Lu J A, et al. Geological occurrence and accumulation mechanism of natural gas hydrates in the eastern Qiongdongnan Basin of the South China Sea: Insights from site GMGS5-W9-2018[J]. Marine Geology, 2019, 418(106042): 1-19.
- [4] Matsumoto R, Tanahashi M, Kakuwa Y, et al. Recovery of thick deposits of massive gas hydrates from gas chimney structures, eastern margin of Japan Sea: Japan Sea shallow gas hydrate project[J]. Fire in the Ice, 2017, 17(1): 1-22.
- [5] Wang X J, Liu B, Qian J, et al. Geophysical evidence for gas hydrate accumulation related to methane seepage in the Taixinan Basin, South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 168: 27-37.
- [6] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marine Geology, 2000, 167: 29-42.
- [7] Mazurenko L L, Soloviev V A. Worldwide distribution of deep-water fluid venting and potential occurrences of gas hydrate accumulations[J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23: 162-176.
- [8] 刘玉山, 祝有海, 吴必豪. 更具开发前景的浅成天然气水合物[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 24-30.
- [9] Mishra C K, Dewangan P, Sriram G. Spatial distribution of gas hydrate deposits in Krishna-Godavari offshore basin, Bay of Bengal[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112(104037): 1-13.
- [10] Joshi J M, Ingo P, Stuart H, et al. Shallow methane hydrate system controls ongoing, downslope sediment transport in a low-velocity active submarine landslide complex, Hikurangi Margin, New Zealand[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014,

- 15: 4137-4156.
- [11] Milkov A V, Sassen R, Panasovich T V A, et al. Global gas flux from mud volcanoes: A significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 1-4.
- [12] Reagan M T, Moridis G J, Elliot S M, et al. Contribution of oceanic gas hydrate dissociation to the formation of Arctic Ocean methane plumes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C09014): 1-11.
- [13] Romer M, Sahling H, Pape T, et al. Geological control and magnitude of methane ebullition from a high-flux seep area in the Black Sea-the Kerch seep area[J]. *Marine Geology*, 2012, 319-322: 57-74.
- [14] 孙运宝, 赵铁虎, 蔡峰. 国外海域天然气水合物资源量评价方法对我国的启示[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(1): 27-35.
- [15] 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 356-362.
- [16] 陈多福, 冯东, Cathles L M. 海底天然气渗漏系统水合物成藏动力学及其资源评价方法[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(2): 278-284.
- [17] Wei J G, Pape T, Sultan T, et al. Gas hydrate distributions in sediments of pockmarks from the Nigerian margin-Results and interpretation from shallow drilling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 359-370.
- [18] You K, Flemings P B, Malinverno A, et al. Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57: 1146-1196.
- [19] Waage M, Portnov A, Serov P, et al. Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20: 630-650.
- [20] Dewangan P, Ramprasad T, Ramana M V, et al. Seabed morphology and gas venting features in the continental slope region of Krishnae Godavari basin, Bay of Bengal: implications in gas-hydrate exploration[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 1628-1641.
- [21] Matveeva T, Weering T C E, Stadnitskaia A. Gas hydrate accumulation associated to the Bonjardim mud volcano (Gulf of Cadiz) mechanisms of formation, thermal models, quantitative gas budget estimations[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2018(10): EGU2008-A-07615.
- [22] Wood W T, Gettrust J F, Chapman N R, et al. Decreased stability of methane hydrates in marine sediments owing to phase-boundary roughness[J]. *Nature*, 2002, 420(6916): 656-660.
- [23] Paganoni M, Cartwright J A, Foschi M, et al. Relationship between fluid-escape pipes and hydrate distribution in offshore Sabah (NW Borneo)[J]. *Marine Geology*, 2018, 295: 82-103.
- [24] Willoughby E C, Latychev K, Edwards R N, et al. Seafloor compliance imaging of marine gas hydrate deposits and cold vent structures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B07107): 1-10.
- [25] Attias E, Amalokwu K, Wattsa M, et al. Gas hydrate quantification at a pockmark offshore Norway from joint effective medium modeling of resistivity and seismic velocity[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113(104151): 1-17.
- [26] Milkov A V, Sassen R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. *Marine Geology*, 2001, 179: 71-83.
- [27] Trehu A M, Long P E, Torres M E, et al. Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222: 845-862.
- [28] Majumdar U, Cook A E. The volume of gas hydrate - bound gas in the northern Gulf of Mexico[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19: 4313-4328.
- [29] Wallmann K, Pinero E, Burwicz E, et al. The global inventory of methane hydrate in marine sediments: A theoretical approach[J]. *Energies*, 2012, 5: 2449-2498.
- [30] Pinero E, Marquardt M, Hensen C, et al. Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10: 959-975.
- [31] Zhostkov R A, Sobisevich A L, Suetnova E I. Mathematical model of accumulation of gas hydrates associated with deep-sea mud volcanoes[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2017, 474(1): 604-606.
- [32] Pinero E, Hensen C, Haeckel M, et al. 3-D numerical modelling of methane hydrate accumulations using PetroMod[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 288-295.
- [33] US Bureau of Mines, US Geological Survey. Principles of a resource/ reserve classification for minerals[S]. US Geological Survey, 1980, Circular 831.
- [34] Max M, Johnson A. Hydrate petroleum system approach to natural gas hydrates exploration[J]. *Petroleum Geoscience*, 2014, 20: 187-199.
- [35] Yi B Y, Lee, G H, Kang N K, et al. Deterministic estimation of gas-hydrate resource volume in a small area of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) from rock physics modeling and pre-stack inversion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 92: 597-608.
- [36] Kioka A, Tsuji T, Otsuka H, et al. Methane concentration in mud conduits of submarine mud volcanoes: A coupled geochemical and geophysical approach[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20: 792-813.
- [37] Snyder G, Sano Y, Takahata N, et al. Magmatic fluids play a role in the development of active gas chimneys and massive gas hydrates in the Japan Sea[J]. *Chemical Geology*, 2020, 535(119462): 1-12.
- [38] Pape T, Geprags P, Hammerschmidt S, et al. Hydrocarbon seep-

- age and its sources at mud volcanoes of the Kumano forearc basin, Nankai Trough subduction zone[J]. *Geochemical, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15: 2180-2194.
- [39] Suetnova E I. Numerical simulation of accumulation of gas hydrates during sedimentation and compaction of sediments under subaqueous conditions[J]. *Physics of the Solid Earth*, 2007, 43(9): 791-797.
- [40] Berndt C, Chi W C, Jegen M, et al. Tectonic controls on gas hydrate distribution off SW Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124: 1164-1184.
- [41] Bui H, Dvorkin J, Nur A. Subsurface fluid flow and its implications for seabed pockmarks and mud volcanoes: An approach of distinct element method (DEM)[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26(1): 2055-2059.
- [42] Leon R, Somoza L, Gimenez-Moreno C J, et al. A predictive numerical model for potential mapping of the gas hydrate stability zone in the Gulf of Cadiz[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1564-1579.
- [43] Sahling H, Bohrmann G, Artemov Y G, et al. Vodyanitskii mud volcano, Sorokin trough, Black Sea: Geological characterization and quantification of gas bubble streams[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1799-1811.

EVALUATION OF NATURAL GAS HYDRATE RESOURCES IN SHALLOW MARINE SEDIMENTS

SUN Yunbao^{1,2}, CAI Feng^{1,2}, LI Qing^{1,2}, YAN Guijing¹, LIANG Jie^{1,2}, DONG Gang¹, LUO Di¹,
LI Ang¹, WANG Xingxing¹, ZHONG Weijie³

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 Shandong Coalfield Geological Planning and Investigation Institute, Jinan 250104, China)

Abstract: The shallow gas hydrate is characterized by shallow burial depth, large thickness and high purity, compared with that in deep sediments. At present, the diffusion gas hydrate in the medium-deep marine sediments is the main target of resource evaluation for the obvious BSR reflection characteristics, while the systematic evaluation of shallow gas hydrate is rarely reported. Based on the formation mechanism of shallow surface hydrate, this paper is devoted to the feasible assessment methods for hydrate resources in shallow sediments, the definition of evaluation scope based on the spatial distribution patterns of gas hydrate, and the selection of evaluation parameters with reference to the comprehensive indication characteristics of hydrate. Finally, preliminary suggestions are made on the selection basis of the calibrated unit of shallow gas hydrate resources and educe the key problems in the resource evaluation methods for shallow gas hydrates.

Key words: shallow gas hydrate; calibrated unit; resource evaluation; numerical simulation