

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.05.013

南海北部陆坡神狐海域 GMGS01 区块细粒 浊积体的识别特征及意义

姜衡^{1,2}, 苏明³, 邬黛黛², 沙志彬⁴, 匡增桂⁴,
吴能友⁵, 雷新华¹, 刘杰², 杨睿², 丛晓荣²

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;

3. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082; 4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510710;

5. 国土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)

摘要:利用广州海洋地质调查局在神狐海域采集的高分辨率地震数据,结合 2007 年第一次水合物钻探航次(GMGS01)获取的岩心资料,从地震反射结构和岩心粒度特征两个方面对 GMGS01 区块内残留在峡谷群脊部的细粒浊积体进行了识别和特征刻画。过水合物钻探站位的准 3D 地震剖面显示,GMGS01 区块似海底反射(bottom simulating reflectors,BSR)之上的沉积体表现为 2 套特征迥异的反射单元:位于下部的薄层透镜状的杂乱反射单元,位于上部的厚层波状起伏形态的连续性中—强振幅反射单元。实际钻获岩心的粒度分析结果表明,沉积物的粒度为 4~63 μm ,为细粒的粉砂或粉砂质泥。自下而上,沉积物的岩性和粒度特征没有发生大的变化,较为相似。但通过粒度 CM 图,可以发现,含水合物层段与不含水合物层段的沉积物表现为不同的特征,含水合物层段沉积物的结果近似与 C=M 基线平行,暗示了细粒浊积体的存在。结合神狐海域区域性覆盖的 2D 地震资料,研究认为发育在神狐海域北部的一系列小型水道,将会侵蚀下部地层的沉积物,使其沿着陆坡坡降的方向发生自北向南的再次搬运,在中—下陆坡的位置以细粒浊积体的形式再次沉积下来。神狐海域细粒浊积体的识别,将为从深水沉积的角度探讨 GMGS01 区块内水合物的不均匀性分布提供依据,从而有助于进一步揭示该区域水合物的成藏机制和富集规律。

关键词:细粒浊积体;天然气水合物;神狐海域;南海北部陆坡

中图分类号:P738

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)05-0131-10

位于南海北部陆坡区域的神狐海域是我国海域天然气水合物勘探的重要区域之一,自 20 世纪 90 年代开始,国土资源部广州海洋地质调查局在该区域进行了大量的地质、地球物理和地球化学调查航次,并圈定了水合物的可能富集区域。2007 年在神狐海域进行了我国首个海域水合物的钻探(GMGS01),获得了实物样品^[1,2],2017 年在该区域成功进行了水合物的试采工作,使得该区域成为目

前海域水合物研究的热点区域之一。

针对神狐海域的含水合物沉积层,前人从岩性组分和粒度特征^[3-5]、生物组分与地层沉积速率^[6-10]、地球化学特征^[11-13]、地震反射特征和沉积相^[14-16]、测井曲线响应^[17,18]等角度开展了精细的描述工作,并尝试对神狐海域水合物的成藏机制和分布规律给出解释^[19-23]。基于神狐海域 GMGS01 区块的准 3D 地震资料,苏明等认为峡谷群脊部处可能存在着薄层的细粒浊积体^[26];通过对 GMGS01 区块内 8 个站位的对比,结合 SH7 站位的粒度分析资料,Su 等认为尽管岩心资料显示自下而上无论是岩性组分和粒度特征都没有大的变化,但 BSR(bottom simulating reflectors,似海底反射)之上存在着 2 套沉积单元,下部为薄层的细粒浊积体,并认为细粒浊积体的空间展布是区域内水合物不均匀性分布的关键控制因素之一^[27]。

区域地质背景研究表明,神狐海域水合物 GMGS01 区块位于珠江口盆地白云凹陷的北部陆

基金项目:国家自然科学基金项目(41576048);油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金(PLC201407);广州市珠江科技新星(201710010198);中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)

作者简介:姜衡(1992—),女,硕士研究生,目前主要从事南海北部陆坡水合物成藏地质条件方面的学习和科研工作, E-mail: 674971720@qq.com

通讯作者:苏明(1983—),男,博士,副教授,目前主要从事深水沉积体系及资源效应、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的教学科研工作, E-mail: suming3@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2017-08-07;改回日期:2017-08-21. 文凤英编辑

坡区域(图 1a), 区域内的近 17 条陆坡限制型海底峡谷位于珠江口峡谷的东北侧, 垂直于陆坡, 峡谷的深泓线弯曲度较小, 呈 NNW-SSE 向线状分布(图 1b), 钻探区位于神狐海底峡谷群的中一下游段位置(图 1c)^[29,30]。海底峡谷群及大规模发育的沉积物失稳现象^[31,32]说明, GMGS01 区块内存在着类型多样、成因复杂的深水沉积体, 并且多是重力诱发的结果。因此, 为了更好地描述神狐海域 GMGS01 区块内, 特别是水合物钻探站位所揭示的深水沉积体类型, 本次研究利用广州海洋地质调查局所采集的高分辨率地震数据, 结合岩心粒度分析结果, 尝试从地震反射结构、岩心粒度特征和粒度 CM 图等方面来刻画似海底反射 BSR 之上含水合物层和不含水合物层的差异, 从而对细粒浊积体进行识别并总结其井震响应特征。此外, 结合区域沉积演化, 本次研究将探讨细粒浊积体对水合物形成与分布的影响, 进而分析南海北部陆坡神狐海域 GMGS01 区块内

水合物不均匀性分布的关键控制因素, 进一步深化该区域的水合物成藏机制与富集规律。

1 区域地质背景

南海北部是我国海域水合物勘探的重点区域, 自 20 世纪 90 年代开始, 广州海洋地质调查局在南海北部进行了大量的水合物调查航次, 圈定了多个指示水合物存在的地质、地球物理和地球化学异常标志。2007、2013、2015 和 2016 年, 广州海洋地质调查局在南海北部组织实施了 4 次水合物钻探(GMGS01、02、03 和 04), 均获取了水合物实物样品, 显示了南海北部优异的水合物资源前景。2017 年 5—7 月, 国土资源部中国地质调查局在南海北部神狐海域进行了我国首次海域天然气水合物试采工作, 连续试气点火 60 天, 累计产气 30.9 万 m³, 平均日产 5 151 m³, 甲烷含量最高达 99.5%^[33]。

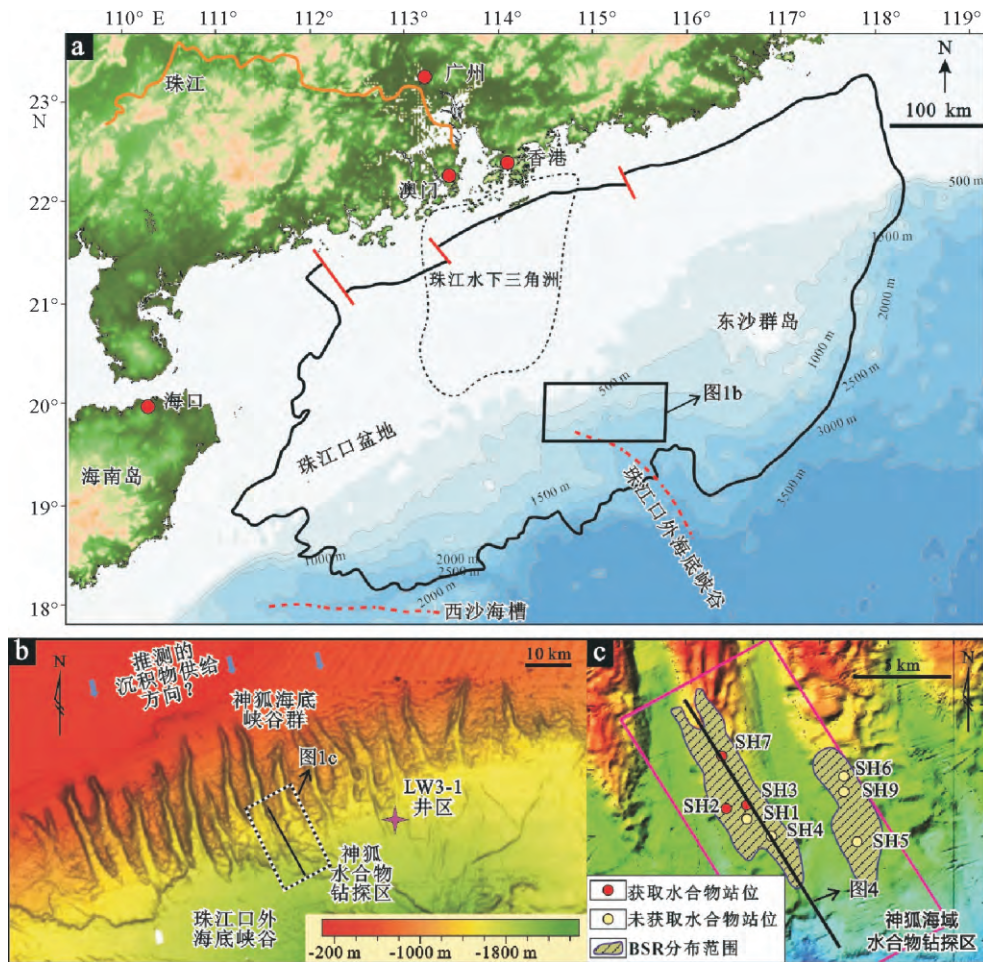


图 1 南海北部陆坡神狐海域区域位置图(a)、海底地貌特征图(b)及 GMGS01 区块内的钻井分布(c)^[28]

Fig. 1 (a) Location map of the Shenhu Area on the northern continental slope of the South China Sea; (from Ding et al., 2013^[28]) (b) Bathymetric map of the study area (Shenhu Area) showing nearly seventeen slope-confined submarine canyons; (c) Locations of hydrate drilling sites of GMGS01 in the Shenhu Area

神狐海域位于南海北部陆坡的中段,介于西沙海槽和东沙群岛之间(图 1a)。西北部是珠江水下三角洲,可能代表了主要的沉积物供给来源,东南部为珠江口外海底峡谷和西北次海盆,代表了沉积物最终的汇聚区域(图 1a)。地理条件上来看,神狐海域位于 200~1 700 m 的水深范围,区域内的海底温度几乎都低于 4 ℃,海底受到的水深压力大于 10 MPa,满足水合物形成所需要的低温高压条件^[34]。构造上,神狐海域隶属于珠江口盆地珠 II 坳陷的白云凹陷,具有相同的构造-沉积演化特征。中中新世以来,受东沙和台湾等构造运动的影响,构造沉降速率在神狐海域表现为异常高值的特征^[21,16]。利用高分辨率地震资料,前人揭示了该区域广泛存在的断裂体系、气烟囱构造、底辟构造等^[19-21,24,35],并初步分析了含气流体运移通道对水合物成藏的影响。受沉积物供给(北部珠江水系和珠江水下三角洲)和地形坡度变化的影响,中中新世以来,神狐海域发育大量的深水水道、海底峡谷、沉积物失稳(滑移、滑塌)等,呈现出类型多样、相互叠置、成因复杂的深水沉积特征。尤其是现今海底地貌图上的陆坡限制型海底峡谷群(图 1b),表现为“U”型或“V”型的形态特征,显示出对下伏地层的侵蚀^[29,30]。

2 GMGS01 区块水合物钻探结果及不均匀性分布特征

2007 年,广州海洋地质调查局在神狐海域组织实施了我国首个水合物钻探航次(GMGS01),实际完成钻探站位 8 个(图 1c),取心站位 5 个(SH1、SH2、SH3、SH5 和 SH7),结合地震资料、测井数据和取心样品,证实钻探区内水合物分布总面积约 22 km²,气体储量约为 194 亿 m³^[1,2]。神狐海域 GMGS01 区块水合物实物样品的获取,使得我国成为继美国、日本、印度之后第 4 个通过国家级研发计划在海底钻探获得水合物实物样品的国家。

GMGS01 区块的钻探结果表明,水合物具有明显的空间分布不均匀性特征:平面上,仅在 SH2、SH3 和 SH7 这 3 个站位中获取了水合物的样品,SH1 和 SH5 站位具有测井曲线的异常,但并未获取实物样品,SH4、SH6 和 SH9 站位因为异常特征不明显而放弃取心(图 1c);垂向上,水合物以浸染状分布于细粒沉积物之中(图 2),且仅仅位于水合物稳定带基底之上 10~40 m 的范围之内^[1,2]。

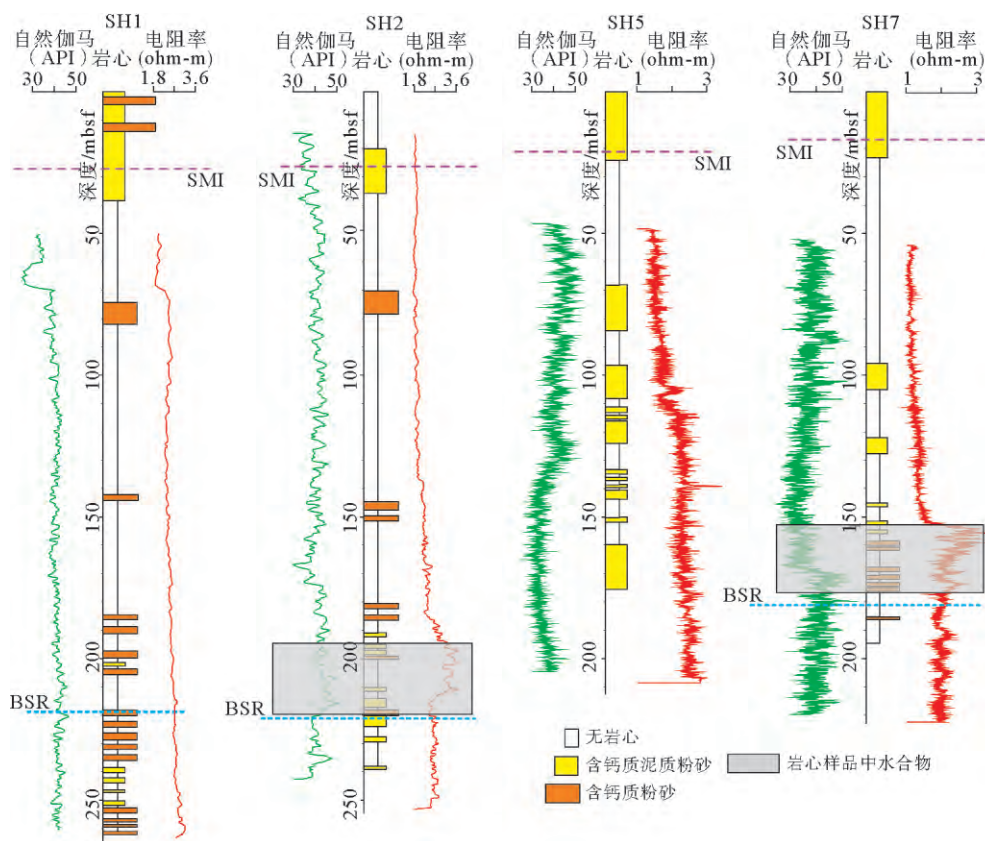


图 2 神狐海域 GMGS01 区块 SH1、SH2、SH5 和 SH7 站位岩性及测井曲线特征

Fig. 2 Correlation of core samples and logging curves at Sites SH1, SH2, SH5 and SH7 in GMGS01 of the Shenhu Area

3 GMGS01 区块沉积物的岩性及粒度特征

取心站位测井曲线、岩心样品及沉积物粒度的分析表明,神狐海域 GMGS01 区块内沉积物表现为如下特征:(1)沉积物由粉砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土等岩性构成,钙质生物(主要是有孔虫、钙质超微化石)丰富(图 2)^[6,7]; (2)自然伽马和电阻率曲线整体上特征变化幅度较小,齿化程度较高;(3)沉积物的粒度较细,SH1、SH2、SH5 和 SH7 等 4 个站位处沉积物的平均粒径(M_z)范围为 6.2~7.9 Φ (图 3)。

神狐海域 GMGS01 区块内的钻探结果表明,水合物以浸染状或弥散状分布于细粒的泥质粉砂—粉砂质泥当中^[3,4],自下而上,无论是岩性特征还是粒度大小,没有发生明显地变化(图 2 和图 3)。也就是说,GMGS01 区块内,含水合物层与不含水合物层之间的差异很小。以 SH2 和 SH7 站位为例,SH2 站位中,含水合物层粒度组分以中粉砂(0.032~0.016 mm)、细粉砂(0.016~0.008 mm)和极细

粉砂(0.008~0.004 mm)粒度为主,砂含量偏低,没有发现细砂—粗砂,仅见极细砂,总体上,与含水合物层上下层位相比粒度组分含量差别不大;SH7 站位中,尽管含水合物层的沉积物颗粒要略粗,以中砂和极细砂为主,但垂向上的差异并不明显^[3]。

4 BSR 之上 2 套沉积单元特征及细粒浊积体的识别

4.1 地震反射结构及差异

不连续岩心样品的岩性和粒度自下而上没有发生大的变化(图 2 和图 3),说明水合物稳定带之上,含水合物沉积体和不含水合物沉积体是相似的^[3,4]。但是,通过 GMGS01 区块内的高分辨率地震资料,在 BSR 之上,仍然可以发现 2 套特征迥异的地震反射单元^[26,27]。为了更好地展示它们的差异,本次研究选择了 GMGS01 区块内过 SH7 和 SH3 站位的准 3D 地震剖面加以刻画(图 4)。

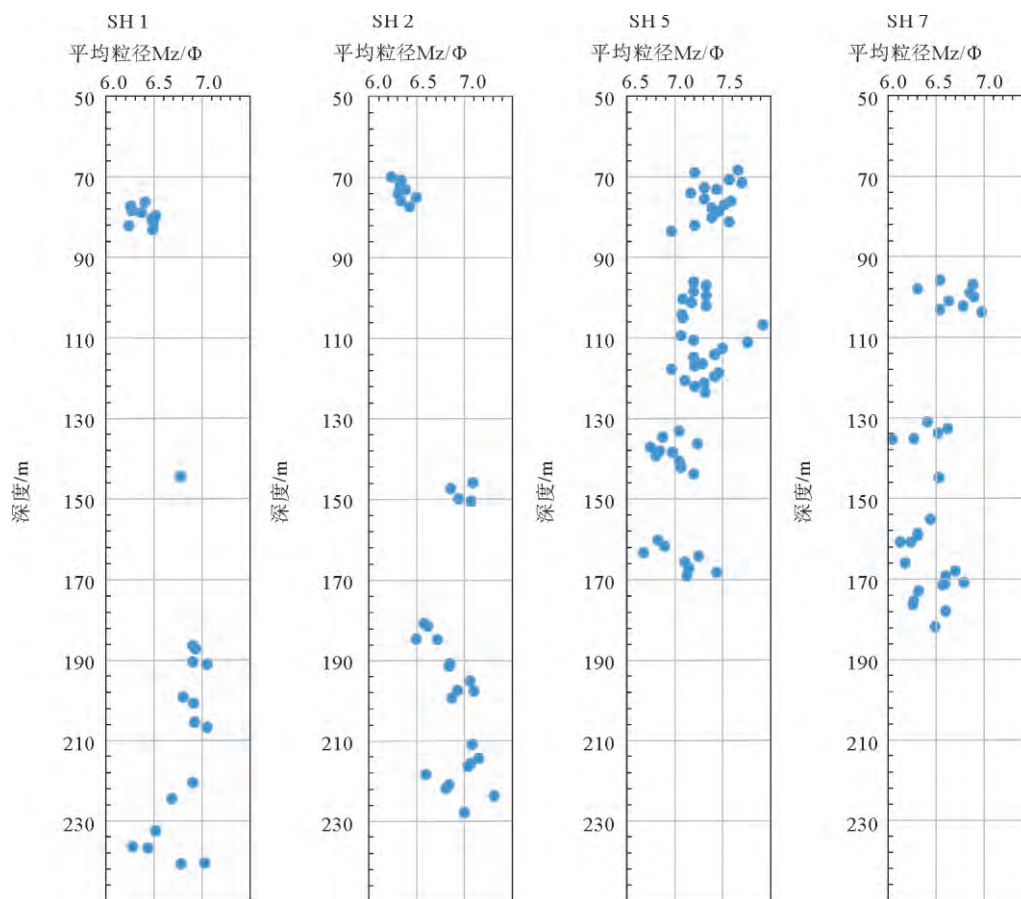


图 3 神狐海域 GMGS01 区块 SH1、SH2、SH5 和 SH7 站位岩心平均粒径分析结果

Fig. 3 Variation in mean grain sizes at Sites SH1, SH2, SH5 and SH7 in GMGS01 of the Shenhu Area

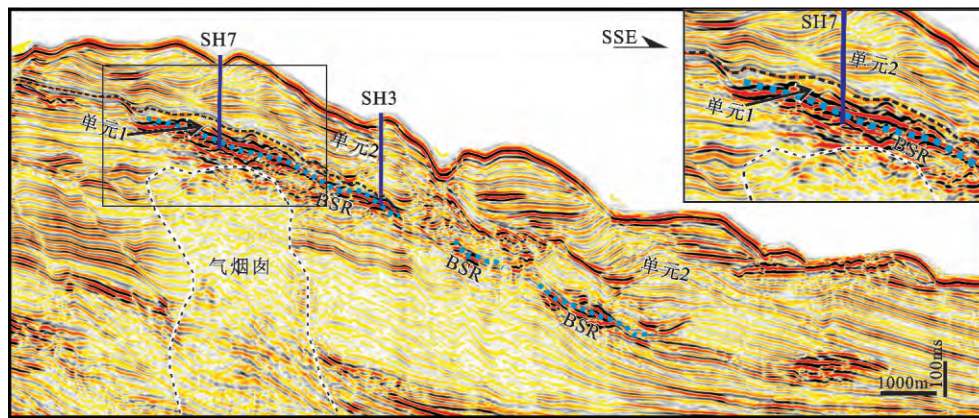


图 4 神狐海域 GMGS01 区块过 SH7 和 SH3 站位的地震测线揭示的 BSR 之上的 2 套地震反射单元
Fig. 4 Seismic profile across Sites SH7 and SH3 in GMGS01 of the Shenhu Area, revealing two distinct seismic units above BSR with different seismic reflections

高分辨率地震测线穿过了陆坡限制型海底峡谷西部一侧的脊部(图 1c),从地震剖面上,可以发现 BSR 之上存在着 2 个特征不同的反射单元(图 4)。单元 1 位于底部,表现为薄层、透镜状/扁豆状的形态(图 4 中的放大部分),地震反射同相轴的振幅较强,局部为杂乱反射特征。单元 2 位于上部,厚层,表现出与下部截然不同的特征。一方面,地震反射同相轴为中等反射强度,连续性较好,整体具有波状起伏的形态结构;另一方面,尽管局部可见一些小规模的错段,但内部的层理大多保持原有的样式和特征,并未见到明显地扰动和破坏(如杂乱反射等)(图 4)。具有波状起伏形态特征和连续性中等反射强度的单元 2 在神狐海域内广泛发育,尤其是位于陆坡限制型海底峡谷群的脊部,GMGS01 区块内的高分辨率地震资料能够较为清晰地揭示其形态和结构特征^[27],该沉积单元被解释为沉积物失稳(也称海底滑坡体或滑移体)^[27,31,32]。

4.2 粒度 C-M 图特征及差异

以 SH7 站位为例(图 4),神狐海域 GMGS01 区块内的水合物钻探站位揭示了上述 2 套沉积单元^[27],下部的沉积单元 1 对应于含水合物层段(155~176.7 mbsf(meters below seafloor)),上部的沉积单元 2 对应于不含水合物层段(0~155 mbsf)。岩心样品以及粒度测试分析结果可用于获得粒度 C-M 图版,其中 C 是粒度分析资料累积曲线上颗粒含量 1% 处对应的粒径, M 值是累计曲线上 50% 处对应的粒径,即粒度中值。C 值与样品中最粗颗粒的粒径相当,代表了水动力搅动开始搬运的最大能量; M 值是中值,代表了水动力的平均能量^[36]。当

样品数量能够保证时(一般要多于 20~30 个样品数值),根据数值的整体形态、分布范围以及与 $C=M$ 基线的关系等特点,结合其它特征,从而对沉积环境作出综合判断^[36]。利用 SH7 站位处的 116 个样品的粒度分析资料, Su 等^[27] 获得了该站位的粒度 C-M 图版,并指出含水合物层段的样品在 C-M 图版中几乎与 $C=M$ 基线平行,结合薄层透镜状强振幅的地震反射特征,推测沉积单元 1 为浊流沉积体。

本次研究选择了 SH1、SH2、SH5 和 SH7 共 4 个站位,利用广州海洋地质调查局的粒度分析结果,获得了 4 个站位的粒度 C-M 图版(图 5)。其中 SH2 和 SH7 站位为获取水合物实物样品的站位(图 5a 和图 5b),而 SH1 和 SH5 站位为未获得水合物的站位(图 5c 和图 5d)。从图 5 中不难发现, SH2 和 SH7 站位中,含水合物深度段内样品点主要分布在 M 值 7~20、C 值 60~100 的范围之内,且整体趋势表现出与 $C=M$ 基线近似平行的特征(橙色实心圆点),说明含水合物深度段的样品为浊流沉积的结果。而不含水合物的层段在 C-M 图版中位于 M 值 4~20 之间(主体数值小于 10),且 C 值分布范围较广(60~500 之间)(蓝色实心三角形)。这种特征在 SH1 和 SH5 站位中更为明显,样品的 M 值主要集中在 3~10 的范围之内,而 C 值的分布范围较广(20~400)(图 5c 和图 5d)。

将上述 4 个站位的结果综合在一起(图 6),能够更为清晰地揭示 GMGS01 区块内含水合物层段与不含水合物层段之间的关系,从整体上揭示 2 套沉积单元在微观粒度特征上的差异。从图 6 中可以发现, GMGS01 区块内含水合物样品的结果(橙色实心圆点)位于图版中 M 值 7~20、C 值 60~100

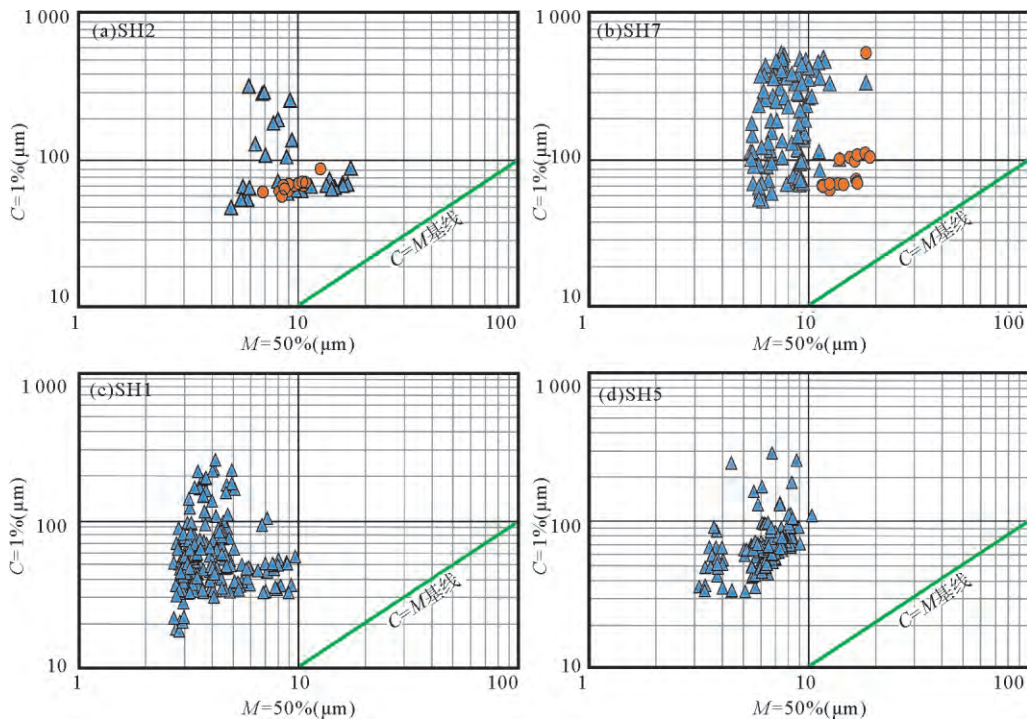


图5 神狐海域 GMGS01 区块 SH2、SH7、SH1 和 SH5 站位的粒度 C-M 图版

Fig. 5 Grain size C-M pattern at sites SH2, SH7, SH1 and SH5 in GMGS01 of the Shenhu Area

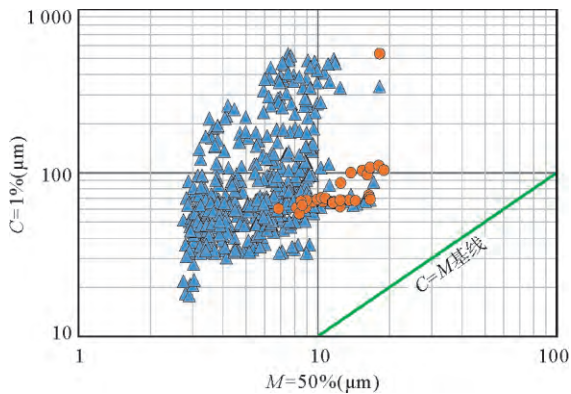


图6 神狐海域 GMGS01 区块粒度 C-M 综合图版

(利用 SH2、SH7、SH1 和 SH5 站位)

Fig. 6 Comprehensive C-M pattern in GMGS01 of the Shenhu Area (using the results of sites SH2, SH7, SH1 and SH5)

(主体都小于 100) 的范围之内, 整体趋势表现为与 $C=M$ 基线近似平行的特征(图 6 中右上角的点推测为异常值), 为浊流沉积体。与之相对, GMGS01 区块内不含水合物样品的结果(蓝色实心三角形)位于图版中 M 值 $2\sim 20$ (主体都小于 10)、 C 值 $20\sim 500$ 的范围之内, 整体趋势与 $C=M$ 基线具有一定的夹角。

利用多个站位获得的粒度 C-M 综合图版(图 6)能够清晰地展示 GMGS01 区块含水合物样品与

不含水合物样品之间的差异, 通过其数值分布范围和整体趋势, 结合沉积单元在地震反射特征上的差异, 综合判断下部沉积单元 1 为浊流沉积体。此外, 区块内不同站位之间的对比(图 5), 能够明显地显示含水合物站位(如 SH2 和 SH7)与不含水合物站位(如 SH1 和 SH5)之间的差异, 说明沉积单元 1 在 SH1 和 SH5 站位中并没有出现或被揭示, 这也暗示了沉积差异(即沉积单元 1 是否存在)可能与水合物的产出差异具有密切的关联。

5 讨论

基于 GMGS01 区块高分辨率地震资料和水合物钻探站位岩心粒度分析结果, 综合宏观上地震反射结构的差异(图 4)和微观上岩心粒度 C-M 图的差异(图 5 和图 6), 尽管自下而上岩心在岩性和粒度特征上没有发生大的变化(泥质粉砂或粉砂质泥), 具有相似性^[3,4], 但站位岩心所揭示的并不是相同沉积环境下的沉积结果。BSR 之上的细粒沉积物可以划分为 2 个沉积单元: 下部的薄层细粒浊积体(沉积单元 1)和上部的厚层细粒沉积物失稳体(沉积单元 2)。通过区域性沉积演化过程分析, 薄层细粒浊积体被认为与神狐海域北部区域性分布的小型水道相关, 早期沉积物将被侵蚀, 沿着坡降发生

自北向南的再次搬运,在下陆坡的位置以细粒浊积体再次沉积下来^[26,27];而厚层细粒沉积物失稳被认为是北部充足的沉积物供给^[37,38]与地形坡降共同控制所形成的结果^[31,32]。也就是说,这 2 套细粒沉积单元具有不同的成因机制和演化过程。

海洋沉积环境中,浊流沉积体通常代表着沉积物再搬运和再沉积的结果,与半远洋和远洋的细粒沉积物相比具有较好的沉积物物性条件,能够为海域水合物提供适宜的储集空间。如卡斯卡迪亚大陆边缘^[39]、印度 Krishna - Godavari 盆地^[40]、美国墨西哥湾^[41,42]、日本南海海槽^[43,44]、韩国郁龙盆地^[45,46]等,均已证实浊积体与水合物之间存在着密切的关联。而对于沉积物失稳而言,特别是在其内部层有发生大的扰动和破坏而改变其原始层理的状态下,往往是软的沉积物发生变形作用导致的结果^[47]。而这一相对持续时间较长的过程必然会导致其内部颗粒之间具有更高的接触程度^[48],从而引起物性条件的降低。此外,软的沉积物变形过程中伴随着含水沉积物(或者液化沉积物)的流动,使得细粒沉积物当中泥基含量增加^[49],这也会引起物性条件的降低。因此,在深海环境中,沉积物失稳通常不被认为具有良好的储层潜力。

基于上述分析,本次研究认为,BSR 之上 2 套具有不同成因机制和沉积过程的细粒沉积单元对于水合物的形成和富集起到了不同的作用。下部的薄层细粒浊积体与上部的厚层细粒沉积物失稳相比,具有更好的沉积物性条件,因此,沉积单元 1(细粒浊积体)被视为水合物的储集层,而沉积单元 2(细粒沉积物失稳)可能更多地表现为水合物的盖层。我们进一步认为 BSR 之上的沉积差异可能是神狐海域 GMGS01 区块内水合物不均匀性分布的关键控制因素。如图 7 所示,较低垂向通量的甲烷^[12]将会沿着气烟囱发生垂向运移,进入到水合物稳定带内。这些甲烷将会优先在物性条件较好、位于下部的薄层细粒浊积体(沉积单元 1)之中富集,并形成水合物;而上覆的细粒沉积物失稳(沉积单元 2)将会表现为区域盖层,阻碍含气流体的进一步垂向运移。同时,细粒浊积体中已经形成的水合物也会阻碍含气流体的进一步垂向运移。因此,位于上部的厚层细粒沉积物失稳中甲烷的含量将会很少,从而使得水合物全部被“限制”在细粒浊积体当中^[27]。垂向上,薄层细粒浊积体位于 BSR 之上的下部,能够初步解释在 SH2、SH3 和 SH7 站位处,水合物通常位于稳定带基底之上 10~40 m 的范围之内;而平面上,苏明等^[26]提出的细粒浊积体的分布范围,

可以初步解释 SH1、SH4、SH5、SH6 和 SH9 站位未获取水合物的原因,即这 5 个站位处薄层的细粒浊积体均不发育。

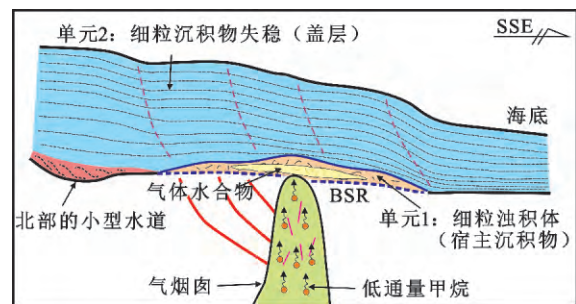


图 7 神狐海域 GMGS01 水合物的成藏模式图(据文献^[27])

Fig. 7 Possible model for the formation of hydrates in GMGS01 of the Shenhu Area (from reference^[27])

6 结论

综合神狐海域区域地质背景和前人研究认识,本次研究利用神狐海域水合物 GMGS01 区块高分辨率地震资料和岩心粒度分析结果,从宏观的地震反射结构和微观的粒度 $C-M$ 图版特征对研究区 BSR 之上的细粒浊积体进行了识别和特征的刻画。尽管从岩性和粒度特征上看,GMGS01 区块站位岩心自下而上没有发生大的变化,均为细粒的泥质粉砂和粉砂质泥。但是,利用过站位的高分辨率地震剖面,在 BSR 之上仍可以识别出 2 套特征差异明显的单元:下部的单元 1 为薄层的、透镜状、杂乱强振幅反射,上部的单元 2 为厚层的、连续性、波状起伏、中等强度反射。综合岩心粒度分析资料,也能够揭示上述 2 套单元在粒度 $C-M$ 图版上的差异,对应于下部的沉积单元 1,含水合物深度段的样品在整体趋势上表现为与 $C=M$ 基线近似平行的特征。综合地震反射特征差异和岩心粒度 $C-M$ 图版差异,并结合区域沉积过程分析,本次研究将下部的薄层沉积单元 1 解释为细粒浊积体,而上部的厚层沉积单元 2 解释为细粒沉积物失稳。

神狐海域 GMGS01 区块内 2 套细粒沉积单元的识别,将为该区域水合物的成藏富集规律提供沉积学角度的解释和分析。下部的细粒浊积体可视为水合物的储集层,而上部的细粒沉积物失稳则表现为水合物的区域性盖层。当低垂向通量的含气流体通过气烟囱等运移通道进入到水合物稳定带内时,甲烷将优先在细粒浊积体中富集并形成水合物,而在细粒沉积物失稳中的甲烷含量过低从而导致水合

物无法形成。因此,细粒浊积体的空间分布将是GMGS01 区块内水合物不均匀性分布的关键控制因素之一。

参考文献 (References)

- [1] Wu Nengyou, Yang Shengxiong, Zhang Haiqi, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu area, North Slope of South China Sea [C]//6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), 7 pp, World oils, Vancouver B C, Canada, 6-10 Jul, 2008.
- [2] Yang Shengxiong, Zhang Haiqi, Wu Nengyou, et al. High concentration hydrate in disseminated forms obtained in Shenhu area, North Slope of South China Sea [C]//6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), 10 pp, World oils, Vancouver B C, Canada, 6-10 Jul, 2008.
- [3] 陈芳, 周洋, 苏新, 等. 南海神狐海域含水合物层粒度变化及与水合物饱和度的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 95-100. [CHEN Fang, ZHOU Yang, SU Xin, et al. Gas hydrate saturation and its relation with grain size of the hydrate-bearing sediments in the Shenhu Area of northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(5): 95-100.]
- [4] Liu C L, Ye Y G, Meng Q G, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from Shenhu area in the South China Sea [J]. Marine Geology, 2012, 307-310: 22-27.
- [5] 张辉, 卢海龙, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域沉积物颗粒对天然气水合物聚集的主要影响[J]. 科学通报, 2016, 61(3): 388-397. [ZHANG Hui, LU Hailong, LIANG Jinqiang, et al. The methane hydrate accumulation controlled compellingly by sediment grain at Shenhu, northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(3): 388-397.]
- [6] 陈芳, 苏新, 周洋, 等. 南海北部陆坡神狐海域晚中新世以来沉积物中生物组分变化及意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 1-8. [CHEN Fang, SU Xin, ZHOU Yang, et al. Variations in biogenic components of Late Miocene-Holocene sediments from Shenhu Area in the northern South China Sea and their geological implication[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(2): 1-8.]
- [7] 陈芳, 周洋, 苏新, 等. 南海神狐海域含水合物层底栖有孔虫群落结构与同位素组成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(2): 1-8. [CHEN Fang, ZHOU Yang, SU Xin, et al. Benthic foraminifera and stable isotopic composition of gas hydrate-bearing sediments from Shenhu Area in the northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(2): 1-8.]
- [8] 陈芳, 苏新, 周洋. 南海神狐海域水合物钻探区钙质超微化石生物地层与沉积速率[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(1): 1-9. [CHEN Fang, SU Xin, ZHOU Yang. Late Miocene-Pleistocene calcareous nannofossil biostratigraphy of Shenhu gas hydrate drilling area in the South China Sea and variations in sedimentation rates[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(1): 1-9.]
- [9] 陈芳, 苏新, 陆红锋, 等. 南海神狐海域有孔虫与高饱和度水合物的储存关系[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(5): 907-915. [CHEN Fang, SU Xin, LU Hongfeng, et al. Relations between biogenic component (foraminifera) and highly saturated gas hydrates distribution from Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(5): 907-915.]
- [10] 李承峰, 胡高伟, 张巍, 等. 有孔虫对南海神狐海域细粒沉积层中天然气水合物形成及赋存特征的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(9): 1223-1230. [LI Chengfeng, HU Gaowei, ZHANG Wei, et al. Influence of foraminifera on formation and occurrence characteristics of natural gas hydrates in fine-grained sediments from Shenhu area, South China Sea[J]. Science China: Earth Sciences, 2016, 59(11): 2223-2230.]
- [11] 苏丕波, 雷怀彦, 梁金强, 等. 神狐海域气源特征及其对天然气水合物成藏的指示意义[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 103-108. [SU Pibo, LEI Huaiyan, LIANG Jinqiang, et al. Characteristics of gas source in the waters of Shenhu and their significance to gas hydrate accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 103-108.]
- [12] Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Gas hydrate system of Shenhu Area, northern South China Sea: geochemical results[J]. Journal of Geological Research, 2011, 2011: Article ID 370298.
- [13] ZHU Youhai, HUANG Xia, FU Shaoying, et al. Gas sources of natural gas hydrates in the Shenhu Drilling Area, South China Sea: Geochemical evidence and geological analysis[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2013, 87(3): 767-776.
- [14] 吴时国, 董冬冬, 杨胜雄, 等. 南海北部陆坡细粒沉积物天然气水合物系统的形成模式初探[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1849-1857. [WU Shiguo, DONG Dongdong, YANG Shengxiong, et al. Genetic model of the hydrate system in the fine grain sediments in the northern continental slope of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1849-1857.]
- [15] 马俊明, 薛林福, 付少英, 等. 南海神狐海域地震-沉积相分析与沉积环境演化[J]. 世界地质, 2013, 32(2): 359-365. [MA Junming, XUE Linfu, FU Shaoying, et al. Seismic-sedimentary facies analysis and evolution of sedimentary environment in Shenhu Area, South China Sea[J]. Global Geology, 2013, 32(2): 359-365.]
- [16] Yu X H, Wang J Z, Liang J Q, et al. Depositional characteristics and accumulation model of gas hydrates in northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 74-86.
- [17] 陆敬安, 杨胜雄, 吴能友, 等. 南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 447-451. [LU Jing'an, YANG Shengxiong, WU Nengyou, et al. Well logging evaluation of gas hydrates in Shenhu Area, South China Sea[J]. Geoscience, 2008, 22(3): 447-451.]

- [18] Wang X J, Lee M W, Collett T S, et al. Gas hydrate identified in sand-rich inferred sedimentary section using downhole logging and seismic data in Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 298-306.
- [19] 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1641-1650. [WU Nengyou, YANG Shengxiong, WANG Hongbin, et al. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641-1650.]
- [20] 王力峰, 沙志彬, 梁金强, 等. 晚期泥底辟控制作用导致神狐海域 SH5 钻位未获水合物的分析[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 450-456. [WANG Lifeng, SHA Zhibin, LIANG Jin-qiang, et al. Analysis of gas hydrate absence induced by the late-stage diapir domination in the Borehole SH5 of Shenhu Area[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 450-456.]
- [21] Sun Y B, Wu S G, Dong D D, et al. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 311-314: 32-40.
- [22] 苏正, 曹运诚, 杨睿, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏演化分析研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1764-1774. [SU Zheng, CAO Yuncheng, YANG Rui, et al. Analytical research on evolution of methane hydrate deposits at Shenhu Area, northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(5): 1764-1774.]
- [23] Wang H B, Yang S X, Wu N Y, et al. Controlling factors for gas hydrate occurrence in Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(4): 513-520.
- [24] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(7): 128-135. [LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, SU Xin, et al. Natural gas hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(7): 128-135.]
- [25] Wang X J, Collett T S, Lee M W, et al. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 272-292.
- [26] 苏明, 沙志彬, 乔少华, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2975-2985. [SU Ming, SHA Zhibin, QIAO Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2975-2985.]
- [27] Su M, Yang R, Wang H B, et al. Gas hydrates distribution in the Shenhu Area, northern South China Sea: comparisons between the eight drilling sites with gas-hydrate petroleum system[J]. *Geologica Acta*, 2016, 14(2): 79-100.
- [28] Ding W W, Li J B, Li J, et al. Morphotectonics and evolutionary controls on the Pearl River Canyon System, South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34(3-4): 221-238.
- [29] Li X S, Zhou Q J, Su T Y, et al. Slope-confined submarine canyons in the Baiyun deep-water area, northern South China Sea: variation in their modern morphology[J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37(2): 95-112.
- [30] 刘杰, 苏明, 乔少华, 等. 珠江口盆地白云凹陷陆坡限制型海底峡谷群成因机制探讨[J]. *沉积学报*, 2016, 34(5): 940-950. [LIU Jie, SU Ming, QIAO Shaohua, et al. Forming Mechanism of the Slope-confined Submarine Canyons in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 940-950.]
- [31] He Y, Zhang G F, Wang L L, et al. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 546-560.
- [32] Chen D X, Wang X J, Volker D, et al. Three dimensional seismic studies of deep-water hazard-related features on the northern slope of South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 1125-1139.
- [33] 李刚. 我国可燃冰试采圆满结束[N]. *人民日报*, 2017-07-30(001). [LI Gang. China's production of combustible ice ended[N]. *People's Daily*, 2017-07-30(001).]
- [34] 张树林, 陈多福, 黄君权. 白云凹陷天然气水合物成藏条件[J]. *天然气工业*, 2007, 27(9): 7-10. [ZHANG Shulin, CHEN Duofu, HUANG Junquan. Conditions of accumulation of gas hydrate in Baiyun Sag[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(9): 7-10.]
- [35] 苏明, 杨睿, 吴能友, 等. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制[J]. *地质学报*, 2014, 88(3): 318-326. [SU Ming, YANG Rui, WU Nengyou, et al. Structural characteristics in the Shenhu Area, northern continental slope of South China Sea, and their influences on gas hydrate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(3): 318-326.]
- [36] Passega R. Grain size representation by Cm Patterns as a geological tool [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, 34: 830-847.
- [37] Lüdmann T, Wong H K, Wang P X. Plio-Quaternary sedimentation processes and neotectonics of the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(3-4): 331-358.
- [38] Zhou W, Wang Y M, Gao X Z, et al. Architecture, evolution history and controlling factors of the Baiyun submarine canyon system from the middle Miocene to Quaternary in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 389-407.
- [39] Torres M E, Tréhu A M, Cespedes N, et al. Methane hydrate formation in turbidite sediments of northern Cascadia, IODP Expedition 311[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 271(1-4): 170-180.
- [40] Riedel M, Collett T S, Shankar U. Documenting channel features associated with gas hydrates in the Krishna - Godavari Basin, Offshore India[J]. *Marine Geology*, 2011, 279

- (1-4): 1-11.
- [41] Boswell R, Frye M, Shelander D, et al. Architecture of gas-hydrate-bearing sands from Walker Ridge 313, Green canyon 955, and Alaminos canyon 21: northern deepwater Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 134-149.
- [42] Boswell R, Collett T S, Frye M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 4-30.
- [43] Noguchi S, Shimoda N, Takano O, et al. 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1817-1828.
- [44] Ito T, Komatsu Y, Fujii T, et al. Lithological features of hydrate-bearing sediments and their relationship with gas hydrate saturation in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 368-378.
- [45] Riedel M, Bahk J J, Kim H S, et al. Seismic facies analyses as aid in regional gas hydrate assessments. Part-II: prediction of reservoir properties, gas hydrate petroleum system analysis, and Monte Carlo simulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 269-290.
- [46] Riedel M, Collett T S, Kim H S, et al. Large-scale depositional characteristics of the Ulleung Basin and its impact on electrical resistivity and Archie-parameters for gas hydrate saturation estimates[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 222-235.
- [47] Mills P C. Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures—a review[J]. *Sedimentary Geology*, 1983, 35(2): 83-104.
- [48] Hüneke H, Mulder T. *Deep-Sea Sediments*[M]//Developments in Sedimentology. Amsterdam: Elsevier, 2011: 1-849.
- [49] Normark W R, Gutmacher C E, Chase T E, et al. *Monterey fan, pacific ocean*[C]//Bouma A H, Normark W R, Barnes N E. *Submarine Fans and Related Turbidite Systems*. New York: Springer-Verlag, 1985: 79-86.

FINE-GRAINED TURBIDITES IN GMGS01 OF THE SHENHU AREA, NORTHERN SOUTH CHINA SEA AND ITS SIGNIFICANCE

JIANG Heng^{1, 2}, SU Ming³, WU Daidai², SHA Zhibin⁴, KUANG Zenggui⁴,
WU Nengyou⁵, LEI Xinhua¹, LIU Jie², YANG Rui², CONG Xiaorong²

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Natural Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China;

5. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based upon the high-resolution seismic data acquired by the Guangzhou Marine Geological Survey and the cores collected by the First Hydrate Drilling Expedition (GMGS01), a kind of fine-grained turbidite is identified in the Shenhu Area of the northern South China Sea. According to the seismic profiles crossing hydrate drilling sites, two seismic units are recognized above the BSR (bottom simulating reflectors): the Unit 1 at the bottom consisting of thin-bedded lenticular chaotic seismic reflectors and the Unit 2 at the top consisting of thick continuous moderate-amplitude seismic reflectors with wavy structures. Grain size analysis illustrates that the deposits are composed of fine-grained silt or silty clay ranging 4-63 μm in grain size. Both the lithological features and grain size parameters are consistent from bottom to top without significant changes. It implies that all the deposits should be the results of a similar depositional process. Moreover, on the *C-M* diagram, the samples from the hydrate bearing sediments show a distribution pattern parallel to the $C=M$ baseline, indicating an origin of fine-grained turbidites. Regional survey suggests that these fine-grained turbidites might be associated with some small-scale channels in the north of the Shenhu Area. The sediments provided by these small channels move downslopes and re-deposited in the middle to lower slope as fine-grained turbidites. Based upon the above interpretation, a model is proposed to reveal the relationships between fine-grained turbidites and hydrates. It says that the heterogeneous distributions of gas hydrates in GMGS01 of the Shenhu Area, northern South China Sea probably owes its origin to the uneven distribution of fine grained turbidites.

Key words: fine-grained turbidites; gas hydrate; northern continental slope of the South China Sea; Shenhu area