

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.03109

深水沉积体系研究进展及其对南海北部 陆坡区天然气水合物研究的启示

苏明^{1,2}, 杨睿^{1,2}, 张翠梅³, 丛晓荣^{1,2}, 梁金强⁴, 沙志彬⁴

(1. 中国科学院 广州能源研究所可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院 广州天然气水合物研究中心, 广州 510640;

3. 中国科学院 边缘地质重点实验室, 中国科学院 南海海洋研究所, 广州 510301;

4. 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要:近年海域天然气水合物勘探和研究表明, 水合物的形成、聚集和分布往往与浅层深水沉积体之间存在紧密联系, 随着深水观测和钻探技术的提高以及高分辨三维地震资料的使用, 深水沉积体系研究进入了一个快速发展的阶段, 在水合物远景区域内对浅层深水沉积体进行精细刻画已成为海域天然气水合物勘探的热点和难点。通过分析国内外深水沉积体系研究现状, 从浅层深水沉积体与海域天然气水合物的关系入手, 对现有研究方法和手段、深水沉积体的发展趋势进行总结和分析, 结合南海北部陆坡天然气水合物勘探研究现状和存在问题, 提出应该在浅层深水沉积体发育类型和沉积背景、浅层深水沉积体的内部构成和空间分布、以及浅层深水沉积体与水合物耦合关系等三方面加强研究, 以期为我国海域天然气水合物勘探和研究提供参考。

关键词:深水沉积体系; 天然气水合物; 南海北部陆坡区

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2013)03-0109-08

随着沉积学的不断发展, 深水沉积体系及其资源、环境效应等方面的研究受到越来越多的关注和重视。“深水沉积体系”一词的含义是“沉积于深水(深海)环境中的沉积体”, 它包括了重力流沉积体和等深流沉积体。本文中所指的深水沉积体主要是指前者, 即陆源碎屑沉积物在重力驱动下, 由陆架-陆坡体系向深海盆运移, 并在这些部位沉积下来的沉积体系。深水沉积体系的研究始于1872年“挑战者号”的环球航次^[1], 从20世纪80年代开始, 围绕着“浊流”、“浊积岩”等概念, 关于深水沉积体系分类和沉积模式的争论就延续至今^[2-10]。

天然气水合物(以下简称“水合物”)广泛分布于陆缘深水盆地的海底沉积物和陆地的永久冻土带中, 具有“分布广、储量大和超清洁性”等特征, 被视为未来的替代能源之一^[11-16]。此外, 作为一种笼状化合物, 在温压条件发生变化时, 水合物极易发生分

解, 释放出水 and 甲烷, 正是这种“不稳定性”特征, 使其在海洋地质灾害^[17-18]和环境效应^[19-21]方面也具有重要的研究意义。

进入21世纪以来, 世界各国对水合物调查研究和开发准备工作正在步步走向深入, 研究重点由资源调查向开发利用发展。美国、加拿大、俄罗斯、日本、韩国等国都将水合物的勘探和开采作为目标, 制定了相应的国家研究计划, 并预计在2015—2018年前后实现商业开采。我国政府已正式将海域水合物的开采纳入研究工作日程, 并预计在2020年前后实现海上商业化试采工作。从资源调查阶段的圈定水合物富集区域到实现商业开采阶段的具体布置实施, 其中的一个重要环节是针对具体区域的实际地质条件, 查明含水合物层和水合物矿体的空间分布特征并进行资源量和开采潜力的评价。随着资料累积程度的不断提高, 在水合物远景区域内利用地质—地球物理资料对与水合物相关的深水沉积体进行解剖从而精细刻画含水合物层的展布特征, 已成为近年来海域水合物勘探的热点和难点问题。本文通过系统总结国内外含水合物层沉积学的研究现状和深水沉积体系的发展趋势, 针对南海北部陆坡区水合物勘探存在的实际问题, 从水合物沉积层的研究角度提出一些思考和建议, 希望对我国海域水合物成藏机制及其分布规律、水合物资源勘探和科学

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41202080); 国家自然科学基金—广东联合基金项目(U0933004); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2012040006333); 中国科学院广州能源研究所所长创新基金项目(y107r61001)

作者简介: 苏明(1983—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事深水沉积体系与油气勘探、海域天然气水合物成藏地质条件分析。
E-mail: suming@ms.giec.ac.cn

收稿日期: 2012-08-21; 改回日期: 2013-04-22. 周立君编辑

评价提供依据和参考。

1 深水沉积体与海域天然气水合物的关系

与深水油气相比,海域水合物往往富集于海底之下较浅的深水沉积体当中,一般为海底之下几百米的范围之内,可称为“浅层深水沉积体”。由于这些沉积体赋存层位较浅,受后期的改造和破坏作用较少,其几何形态和内部充填能够较为完整地保存下来。

海域水合物资源调查结果表明,水合物的形成和分布与沉积物物性条件和沉积环境关系密切:①粒度较粗、孔渗性较好的沉积体制约了水合物的产出位置。如墨西哥湾 DSDP533 站位揭示水合物储集在颗粒较粗、未固结的沉积物中^[22]; ODP204 航次在西太平洋“水合物脊”处获得的样品显示,稳定带内粉砂质含量占 60%~75%,且水合物主要富集在砂质含量较高的沉积层中^[23]; IO- DP311 航次在 Cascadia 大陆边缘获得的 614 件沉积物样品的粒度分布特征,说明粗粒径沉积物数量增多的位置与水合物出现层位之间存在较好的位置对应关系^[24];南海北部神狐海域水合物的岩心资料指示,粗粉砂含量高的层位与水合物饱和度高的层位具有相关性^[25]。②一些典型的浅层深水沉积体具有较高的沉积速率,能够提供相对较好的储集空间,是水合物形成和聚集的有利场所^[26-27]。如布莱克海台处发育的等深流沉积体^[28]、印度 Krishna-Godavari 盆地和日本海东部 Umitaka 海岭处的碎屑流沉积体^[29-30]、墨西哥湾北部深水区的浊积水道—天然堤复合体系^[31]以及琼东南盆地的大型块体流沉积体^[32]等。

2 含水合物层沉积学研究现状

由于浅层深水沉积体与海域水合物的密切关系,国际上在海域水合物勘探相对成熟的区域针对含水合物层开展了一系列的沉积学研究,内容涉及高精度层序地层格架的建立和对比、浅层深水沉积体的识别和刻画、含水合物层内部结构的精细描述、水合物矿体的追踪和评价等方面,主要的研究方法有 2 类:①在已知水合物区域,利用深水钻探和取样技术获得的较为珍贵的柱状沉积物样品,开展水合物赋存沉积体的岩性、粒度、孔隙度、沉积速率及稳定带厚度等方面的测量和计算,进而对沉积环境、沉

积物物性条件、水合物分布进行判定和分析。这类依赖于沉积物样品的分析方法,充分利用了钻井取样在垂向上的连续性和高分辨率,然而受样品获得难度大、成本高的限制,研究一般为“一孔之见”,无法系统揭示深水沉积体系和含水合物层的平面展布和空间变化特征;②从沉积体的地震响应特征入手,叠合气源、构造背景和水合物识别标志,如似海底反射层(BSR)、典型地貌单元(如滑塌、麻坑、气烟囱)、气体运移通道、特殊地震反射体(如空白反射带、速度异常体)等,识别深水沉积体类型并讨论深水沉积体和水合物的空间配置关系。这类基于地震资料的研究方法,主要是利用地震数据良好的空间分辨率,能够整体把握区域的宏观展布特征和各有利识别标志的叠合关系,但受控于地震资料的分辨率,该类研究的精度较粗、尺度较大,无法精细刻画浅层深水沉积体和含水合物层的内部构成和垂向变化。

如上所述,单一依赖沉积物样品的沉积特征计算或单一依赖地震数据进行相带划分和内部结构刻画,都是远远不够的。因此,有必要将垂向分辨率高的岩心—测井数据与空间连续性强的地震数据有机地结合在一起,以地质模式为指导,对含水合物层进行预测和描述,这就进一步说明了在水合物远景区域内针对浅层深水沉积体的内部构成和空间分布开展系统和高精度研究的重要性和必要性。

3 深水沉积体系研究发展趋势

受多种因素的影响和控制,深水沉积体系在内部构成和空间分布上具有极为复杂的特征。特别是近 30 年以来,伴随着深海钻井深度的记录不断被刷新、深海探测技术(深潜机器人及载人深潜器)、现代海底观测系统、多波束声纳、大容量取样器、高分辨率三维地震技术等方面的进一步发展和完善,深水沉积体系的研究进入了一个快速发展的阶段,一系列的“经典模式”受到挑战和质疑。总体上来看,深水沉积体系的发展趋势表现在以下 3 个方面:

(1) 研究趋于系统化

从地球系统的角度来看,深水沉积体系是沉积物初始形成、搬运、沉积的重要组成部分。在沉积物“由陆向海”的过程中,深水沉积体系控制了沉积物的输送路径和搬运过程,保存了源区较为完整的信息,记录了海平面升降、气候变化、构造活动等一系列事件。因此,对于深水沉积体系不能“孤立”地分析和研究,除了对沉积结果进行详细描述之外,还应该包含物源供给和输送过程等方面的分析。将深水

沉积体纳入到“源汇系统”^[33]之中,才能对其物质来源、运移过程和最终沉积结果形成一个“完整的宏观把握”,这是当今国内外对深水沉积体系研究的主流方向^[34]。例如通过对台湾西南部高屏峡谷的研究发现,沉积物经源区玉山,流经高屏峡谷,最终汇入马尼拉海沟,整个沉积过程可以进一步划分为河流段、深水峡谷段和深水水道段^[35]。

(2)描述趋于精细化

对于深水沉积体系的研究而言,最直接的驱动力当属其巨大的经济价值——深水沉积体系蕴含了丰富的石油、天然气、天然气水合物等能源矿产,因此对其内部结构的精细描述就成为关注的热点:①野外描述与实验室模拟相结合。通过对古代深水沉积体系的野外描述和海底取心的精细刻画,可以直接地观察到自然界中大规模沉积体系的内部结构特征并再现相应的沉积过程,如从露头沉积学研究来重建深海沉积流体动力学过程及输送模式的研究方法是极为有效和准确的^[36]。然而海底沉积物的取样非常昂贵,加之野外研究工作需要花费大量的人力,从而导致盆地级别深水沉积体系的详细沉积学研究非常少见。因此,将野外观测描述与实验室模拟技术相结合将是今后发展的一个重要方向;②三维地震技术对深水沉积体的精细刻画。被誉为“地质哈勃望远镜”^[37]的三维地震技术,能够提供连续的空间分辨率,从而提供关于深水沉积体的一系列平面成像,对其时空分布和演化过程进行“动态再现”。近年来国内外学者通过各种技术手段在深水沉积体系内部结构和时空演化等方面取得了丰富的成果,如墨西哥湾深水水道、西非大陆边缘的深水峡谷、尼罗河三角洲远滨区域的深水水道、南海北部琼东南盆地的中央峡谷和块体流沉积体等^[38-43]。

(3)控制因素趋于复杂化

在实际研究过程中,不同的研究人员从不同的角度出发,抱着不同的目的,使用不同的方法,面对不同或相同的资料,得出的结论肯定不会一样。特别是我们目前可利用的资料还是十分有限的,不能对深水沉积体系进行较为完整和系统的判定,这可能是目前在深水沉积体系研究方面存在较大争论的原因之一。现有研究成果表明,深水沉积体系并不是单一的沉积过程或者说不是一个静态沉积的结果。陆源沉积物在从陆向海的输送和沉淀过程中,沉积物供给能力、构造活动、海平面下降、地貌条件、气候变化以及深水沉积作用等都起到了重要的作用,我们看到的是多因素条件控制下的综合表征。一方面很难建立某一种因

素与沉积体之间的定量对应关系,另一方面,这些因素之间也存在着相互影响的作用。因此,对于深水沉积体系而言,“单一因素控制下的沉积模式”一般并不可取,如盐构造和断层活动影响了巴西 Paleogene Rio Doce 峡谷的发育^[44]、低水位时期由海平面下降所导致的垮塌沉积体和高水位时期的沿岸流控制了 Bari 峡谷的发育位置^[45]。此外,要特别关注深水沉积体系的“分段性”特征,因为在不同区段中沉积体形态和充填特征的差异,往往暗示了主控因素的变化。以琼东南盆地中央峡谷体系为例,笔者在研究过程中发现“单一的浊流自西向东的侵蚀模式”不能完美地解释其形成和演化,东西部峡谷形态和充填特征的差异性分别代表了西部的浊流侵蚀型水道和东部的构造控制型峡谷^[46]。

4 南海北部陆坡区天然气水合物勘探现状和存在问题及建议

南海北部陆坡区呈北东向展布,自西向东为琼东南地区、西沙地区、神狐地区和东沙地区,含3个主要的盆地:琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地。通过多年的区域调查和研究,在我国南海北部陆坡区的多个部位均发现了反映水合物存在的异常标志,圈定了天然气水合物的远景区域,并于2007年在神狐海域首次获取了天然气水合物的实物样品(图1),为南海北部陆坡区天然气水合物成藏机理及分布规律研究奠定了基础^[47-51]。

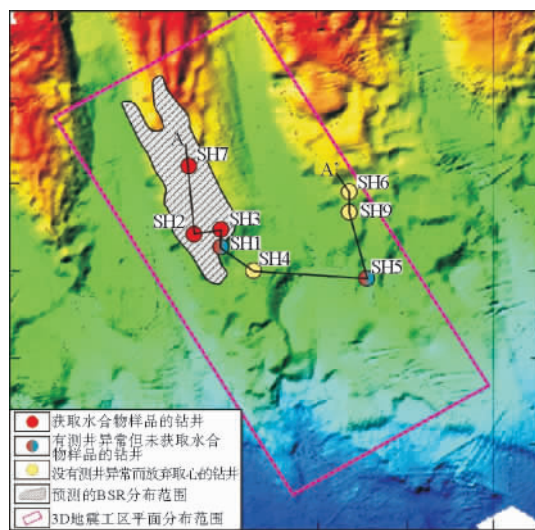


图1 南海北部陆坡区神狐海域天然气水合物实际钻探结果
Fig.1 The drilling results of gas hydrate in Shenhu Area, northern continental slope of the South China Sea

然而总体上看,南海北部陆坡区相关的地质基础资料仍偏少,从含水合物层沉积学角度对深水沉积体系和水合物的相关性研究还处于探索阶段,一些描述性的研究主要集中在深水沉积体系的类型识别上,研究尺度较粗、精度较低。特别是水合物成矿成藏过程中的构造-沉积条件分析、浅层深水沉积体的类型识别、沉积体内部结构的精细描述和时空展布、深水沉积体与水合物的空间配置关系等方面还缺乏系统的研究和统一的认识。我们认为今后需要在以下 3 个方面加强研究:

4.1 浅层深水沉积体的发育类型和沉积背景

受周缘物源供给、地貌条件、构造背景等因素的影响,南海北部陆坡区内发育的深水沉积体系可以归结为两大类:深水水道沉积体系和块体搬运沉积体系^[9]。进一步可以识别出大规模块体流、海底峡谷、深水水道、深水浊积扇、陆架边缘三角洲、扇三角洲、垮塌沉积体等多种类型的浅层深水沉积体^[32,42-43,52-54]。通过典型深水沉积体地震反射特征的识别对其发育类型进行有效的快速判定是需要解决的关键问题之一。以神狐海域为例,自晚中新世以来,该区域发育有多种类型的浅层深水沉积体,如深水峡谷、滑塌体、滑移体、深水扇等(图 2)。各种沉积体相互叠置,如深水峡谷与滑移体(图 2B)、滑移体与杂乱—空白反射的滑塌体(图 2C)等,说明该区域内并不是单一的滑塌扇沉积。此外,由于深水沉积体系大部分是以沉积物的改造和再次搬运为主,其粒度虽说与沉积过程相关,但更重要的是与沉积物来源有密切的关系,不能简单地从沉积体类型来判定其粒度的粗细。由于受不同沉积物供给能力差异的影响,一些深水浊流沉积体可能将以细粒浊积岩的形式出现,而大型块体流可能会将初始沉积的砂质沉积物再次搬运从而导致其粒度相对较粗。因此需要采用“从源到汇”的分析思路,从浅层深水沉积体的特征解剖入手,结合南海北部陆坡区深水

沉积体发育和演化过程中的控制因素分析,才能对其类型和沉积特征进行准确地识别。

4.2 浅层深水沉积体内部结构和空间分布的精细刻画

目前对区域性深水沉积体系的研究工作主要以三级层序作为研究框架,受资料分辨率的影响,对沉积体系内部结构缺乏细致地描述和刻画。同样以神狐海域为例,该区域东西两侧 BSR 之上的地层存在明显东部为强振幅反射、连续性好的地层,发育大量的滑脱断层,表现为滑移体特征,而西部地层的反射能量弱,连续性差(图 3)。此外,从过 SH2 站位的地震剖面中发现,BSR 以上的地层在反射特征上发生了明显变化,由底部的弱振幅、差—中等连续性突变为顶部的中等—强振幅、中等—好连续性,指示 BSR 之上的深水沉积体在内部构成上存在着差异性(图 3)。这种差异性说明,尽管神狐海域自晚中新世以来的地层岩性相似,整体上由一套相对细粒的有孔虫粉砂质黏土—黏土质粉砂组成,但其指示的沉积体类型和沉积背景不尽相同。这种浅层深水沉积体在垂向序列上和空间分布上的变化和特征需要引起我们在研究过程中的重视。

4.3 浅层深水沉积体与水合物分布之间的时空耦合关系

海域水合物的资源调查结果表明,水合物的分布具有非常明显的“不均匀性”特征。这种不均匀性的分布规律一般受到气源供给、构造、温压等条件的差异性控制。但是对于一些“面积小、气源足、运移好(断裂和底辟)、温压条件适宜、构造稳定”的水合物远景区域,浅层深水沉积体内部的“非均质性”可能是水合物分布的关键控制因素。神狐海域的岩心资料显示,虽然与水合物相关的浅层深水沉积体在岩性上差异不大,均较细,但沉积类型、沉积背景、有利沉积单元在粒度和地震反射结构上都表现为明显

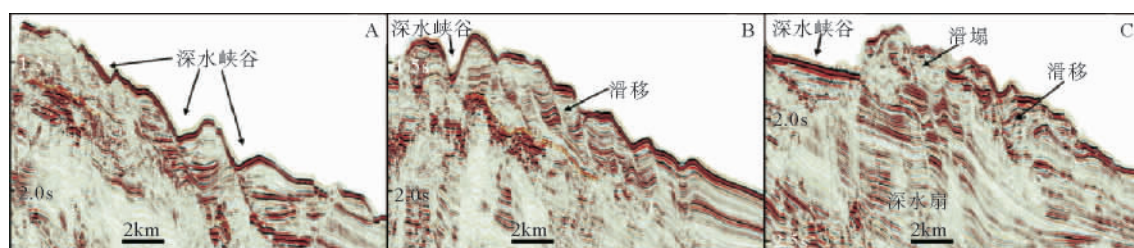


图 2 南海北部陆坡区神狐海域天然气水合物钻探区浅层深水沉积体类型及地震反射特征

Fig. 2 The classification and seismic reflection characteristics of the deep-water depositional system in Shenhu Area, northern continental slope of the South China Sea

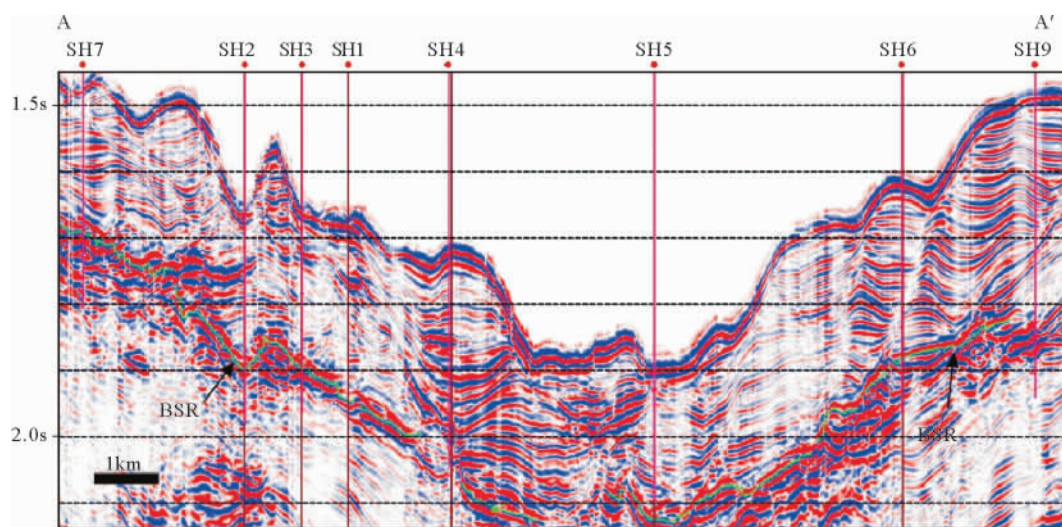


图3 南海北部陆坡区神狐海域天然气水合物钻探区东西两侧地层反射特征差异

Fig. 3 The distinct differences of the seismic reflections between the eastern and western Shenhu Area, northern continental slope of the South China Sea

的差异性。通过充分利用区域上钻井、地震资料,研究单井高频旋回和沉积单元划分、有利沉积单元的岩电性和地震反射结构特征、有利沉积单元的时空展布和演化规律,将有利沉积单元的边界范围、厚度展布和沉积物粒度变化等因素与水合物的实际分布特征相结合,剖析其中的内在联系,建立时空耦合关系,有望揭示远景区域内水合物分布的关键控制因素。

5 结论

(1)浅层深水沉积体与海域水合物的形成和分布关系密切,但目前浅层深水沉积体的发育类型、形成背景、内部构成和空间展布、浅层深水沉积体与水合物的时空耦合关系等方面的研究还处于初步阶段,在水合物远景区域内,将浅层深水沉积体纳入到“源汇系统”当中,基于内部结构的刻画和控制因素的分析,精细描述浅层深水沉积体在垂向序列和空间展布上的差异性及其与水合物分布的内在关联,是今后海域水合物研究的发展趋势。

(2)南海北部陆坡区是我国海域天然气水合物勘探的重点区域。在该区域内,浅层深水沉积体发育类型多样,内部结构复杂,从浅层深水沉积体的角度对含水合物层的研究还处于起步和探索阶段。我们相信随着“十二五”期间国家对海域天然气水合物的重视和研究力度的加大,浅层深水沉积体与天然气水合物相关性研究具有广阔的研究前景,从含

水合物层的沉积学解剖入手,精细刻画浅层深水沉积体的“非均质性”特征,将有利于具有区域性特色的水合物成藏机制的建立,从而为查清我国海域天然气水合物的资源及其分布、加快其开发利用的步伐提供有力的科学依据和建议。

参考文献 (References)

- [1] Murray J, Renard A F. Report on Deep-Sea Deposits Based on Specimens Collected During the Voyage of H. M. S. Challenger in the Years 1872-1876 [M]. London: Government Printer, Challenger Reports, 1891: 525.
- [2] Shanmugam G, Moiola R J. Submarine Fan Models Problems and Solutions [C]//In: Bouma A H, Normark W R, Barnes N E. Submarine fans and related turbidite systems. New York: Springer Verlag, 1985: 29-34.
- [3] Shanmugam G. Deepmarine Sedimentation Depositional Models and Case Histories in Hydrocarbon Exploration and Development [C]//In: Brown G C, Gorsline D S, Schweller W J. Deepmarine Facies Models and the Interrelationship of Depositional Components in Time and Space. San Francisco: SEPM Pacific Section, 1990:199-246.
- [4] Normark W R. Turbidite elements and the obsolescence of the suprafan concept [J]. Giornale di Geologia, ser 3a, 1991, 53 (2): 1-10.
- [5] Walker R G. Turbidites and Submarine Fans [C]//In: Walker R G, James, N P. Facies Models: Response to Sea Level Change, GEO text 1. Toronto: Geological Association of Canada, 1992:239-263.
- [6] 王英民,王海荣,邱燕,等. 深水沉积的动力学机制和响应[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 495-504. [WANG Yingmin, WANG Hairong, QIU Yan, et al. Process of dynamics and its re-

- sponse of deep-water sedimentation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 495-504.]
- [7] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前缘问题[J]. *地质论评*, 2007, 53(1): 36-43. [PAN Xiong, CHEN Changmin, ZHU Ming, et al. Frontier of the deep-water deposition study [J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 36-43.]
- [8] 李祥辉, 王成善, 金玮, 等. 深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 77-86. [LI Xiang, WANG Chengshan, JIN Wei, et al. A review on deep-sea sedimentation theory: significances to oil-gas exploration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 77-86.]
- [9] 吴时国, 秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 922-930. [WU Shiguo, QIN Yunshan. The research of deepwater depositional system in the Northern South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 922-930.]
- [10] 吴因业, 朱如凯, 罗平, 等. 沉积学与层序地层学研究新进展——第 18 届国际沉积学大会综述[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 199-206. [WU Yinye, ZHU Rukai, LUO Ping, et al. Advance on sedimentology and sequence stratigraphy: A summary from 18th International Sedimentology Congress [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 199-206.]
- [11] Dickens G R. The potential volume of oceanic methane hydrates with variable external conditions [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(10): 1179-1193.
- [12] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [13] Buffett B A, Archer D. Global inventory of methane clathrate: Sensitivity to changes in the deep ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227(3-4): 185-199.
- [14] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there? [J]. *Earth-Science review*, 2004, 66(3-4): 183-197.
- [15] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(2): 459-470.
- [16] 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. [WU Nengyou, LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, et al. Marine gas hydrate system: State of the art [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 356-362.]
- [17] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: Testing the clathrate gun hypothesis [J]. *Geology*, 2004, 32(1): 53-56.
- [18] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1-4): 379-401.
- [19] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D C, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(6): 965-971.
- [20] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 天然气水合物的环境效应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(2): 160-165. [WANG Shuhong, SONG Haibin, YAN Wen. Environmental effects of natural gas hydrate [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(2): 160-165.]
- [21] 叶黎明, 罗鹏, 杨克红. 天然气水合物气候效应研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 565-574. [YE Liming, LUO Peng, YANG Kehong. Advances in climatic effects study of gas hydrates [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5): 565-574.]
- [22] Ginsburg G D. Gas hydrate accumulation in deep-water marine sediments [C]//In: Henriot J P, Mienert J. *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climatic Change*. London: Geological Society, Special Publications 137, 1998: 51-62.
- [23] 苏新, 宋成兵, 方念乔. 东太平洋水合物海岭 BSR 以上沉积物粒度变化与气体水合物分布[J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 234-242. [SU Xin, SONG Chengbing, FANG Nianqiao. Variation in grain size of sediments above BSR and correlation with the occurrence of gas hydrates on Hydrates Ridge, East Pacific [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 234-242.]
- [24] 王家生, 高钰涯, 李清, 等. 沉积物粒度对水合物形成的制约: 来自 IODP 311 航次证据[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 659-665. [WANG Jiasheng, GAO Yuya, LI Qing, et al. Grain size constraint on gas hydrate occurrence: evidence from sediment size during IODP 311 [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 659-665.]
- [25] 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.]
- [26] 于兴河, 张志杰, 苏新, 等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 311-315. [YU Xinghe, ZHANG Zhijie, SU Xin, et al. Primary discussion on accumulation conditions for sedimentation of gas hydrate and its distribution in South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 311-315.]
- [27] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜, 等. 鄂霍次克海天然气水合物成藏条件分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 91-100. [LUAN Xiwu, ZHAO Kebin, SUN Dongsheng, et al. Geological factors for the development of gas hydrates in Okhotsk Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 91-100.]
- [28] Matveva T V, Soloviev V A. Geological control over gas hydrate accumulation on the Blake outer ridge [J]. *Geologiya I Geofizika*, 2002, 43(7): 658-668.
- [29] Riedel M, Collett T S, Kumar P, et al. Seismic imaging of a fractured gas hydrate system in the Krishna-Godavari Basin offshore India [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1476-1493.
- [30] Freire A F M, Matsumoto R, Santos L A. Structural-strati-

- graphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1967-1978.
- [31] Boswell R, Frye M, Shelande 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*, 2011, 1-16. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.08.010.
- [32] 王秀娟, 吴时国, 董冬冬, 等. 琼东南盆地块体搬运体系对天然气水合物形成的控制作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(1): 109-118. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, DONG Dongdong, et al. Control of mass transport deposits over the occurrence of gas hydrate in Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(1): 109-118.]
- [33] Driscoll N, Nittrouer C. Source to sink studies [J]. *Margins Newsletter*, 2000, 5: 1-3.
- [34] 汪品先. 深海沉积与地球系统[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 1-11. [WANG Pinxian. Deep sea sediments and earth system [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 1-11.]
- [35] Chiang C S, Yu H S. Evidence of hyperpycnal flows at the head of the meandering Kaoping Canyon off SW Taiwan [J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(3): 161-169.
- [36] Baas J H. Sediment gravity flows: Recent advances in process and field analysis-introduction [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 179(1-2): 1-3.
- [37] Cartwright J A, Huuse M. 3D seismic technology: the geological Hubble [J]. *Basin Research*, 2005, 17(1): 1-20.
- [38] Posmentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [39] Antobreh A A., Krastel S. Morphology seismic characteristics and development of Cap Timiris Canyon, offshore Mauritania: A newly discovered canyon preserved-off a major arid climatic region [J]. *Marine and petroleum geology*, 2006, 23(1): 37-59.
- [40] Catterall V, Redfern J, Gawthorpe R, et al. Architectural style and quantification of a submarine channel-Levee system located in a structurally complex area: offshore Nile Delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 991-1017.
- [41] Yuan S G, Wu S G, Thomas L, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1441-1451.
- [42] 苏明, 李俊良, 姜涛, 等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 85-93. [SU Ming, LI Junliang, JIANG Tao, et al. Morphological features and forming mechanism of Central Canyon in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea [J]. *Marine geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 85-93.]
- [43] 何云龙, 解习农, 陆永潮, 等. 琼东南盆地深水块体流构成及其沉积特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 905-913. [HE Yunlong, XIE Xinong, LU Yongchao, et al. Architecture and characteristics of mass transport deposits (MTDs) in Qiongdongnan Basin in northern South China Sea [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 905-913.]
- [44] Alves T M, Cartwright J, Davies R J. Faulting of salt-withdrawal basins during early halokinesis: Effects on the Paleogene Rio Doce Canyon system (Espirito Santo Basin, Brazil) [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(5): 617-652.
- [45] Ridente D, Foglini F, Minisini D, et al. Shelf-edge erosion, sediment failure and inception of Bari Canyon on the South-western Adriatic Margin (Central Mediterranean) [J]. *Marine Geology*, 2007, 246(2-4): 193-207.
- [46] Su M, Xie X N, Li J L, et al. Gravity flow on slope and abyssal systems in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2011, 85(1): 243-253.
- [47] 姚伯初, 杨木壮, 吴时国, 等. 中国海域的天然气水合物资源[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 333-341. [YAO Bochu, YANG Muzhuang, WU Shiguo, et al. The gas hydrate resources in the China seas [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 333-341.]
- [48] 邓希光, 吴庐山, 付少英, 等. 南海北部天然气水合物研究进展[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(2): 67-74. [DENG Xiguang, WU Lushan, FU Shaoying, et al. The research advances of natural gas hydrates in northern South China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(2): 67-74.]
- [49] 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. [FU Shaoying, LU Jingan. The characteristics and origin of gas hydrate in Shenhu area, South China Sea [J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(9): 6-10.]
- [50] 黄霞, 祝有海, 卢振权, 等. 南海北部天然气水合物钻探区烃类气体成因类型研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 576-580. [HUANG Haixia, ZHU Youhai, LU Zhenquan, et al. Study on genetic types of hydrocarbon gases from the gas hydrate drilling area, the northern South China Sea [J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 576-580.]
- [51] Wang X J, Wu S G, Lee M, et al. Gas hydrate saturation from acoustic impedance and resistivity logs in the Shenhu area, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(9): 1625-1633.
- [52] 庞雄, 申俊, 袁立忠, 等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 11-16. [PANG Xiong, SHEN Jun, YUAN Lizhong, et al. Petroleum prospect in deep-water fan system of the Pearl River in the South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(3): 11-16.]
- [53] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 65-72. [WANG Dawei, WU Shiguo, QIN Zhiliang, et al. Architecture and identification of large Quaternary mass transport depositions in the slope of South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 65-

72.]
[54] Sun Q L, Wu S G, L dmann Th, et al. Geophysical evidence for cyclic sediment deposition on the southern slope of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Marine Geophysical Researches, 2011, 32(3): 415-428.

PROGRESS IN STUDY OF DEEP-WATER DEPOSITIONAL SYSTEMS IN THE NORTHERN CONTINENTAL SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA AND ITS IMPLICATIONS FOR GAS HYDRATE RESEARCH

SU Ming^{1,2}, YANG Rui^{1,2}, ZHANG Cuimei³, CONG Xiaorong^{1,2}, LIANG Jinqiang⁴, SHA Zhibin⁴

(1. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Recent researches of marine gas hydrate indicate that the formation, migration and distribution of the gas hydrate have close relationship with deep-water depositional systems. With the development of deep-water observations and drilling technology and the wide use of high-resolution 3D seismic data, the studies on deep-water depositional systems have made great progress. Consequently, the analysis and description of the deep-water deposits in the shallow layers in a promising target area have become a hot and difficult question in gas hydrate exploration. This paper aims to provide a systematic study on the progress of the deep-water depositional system from following aspects: source to sink system, internal architecture description, and complex controlling factors. In combination with the current situation and problems of gas hydrate exploration on the northern continental slope of the South China Sea, some suggestions were proposed, including the analysis of deep-water depositional types and background, the description of the internal architecture and evolution of the deep-water deposits in the shallow layers, and the relationship between the deep-water deposits and gas hydrate in the shallow layers, in order to provide a reference for research and exploration of gas hydrate in the region.

Key words: deep-water depositional systems; gas hydrate; northern continental slope of the South China Sea