

doi:10.3799/dqkx.2013.089

南海神狐海域有孔虫与高饱和度水合物的储存关系

陈芳^{1,2}, 苏新³, 陆红锋^{1,2}, 周洋^{1,2}, 庄畅^{1,2}

1. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

2. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510075

3. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

摘要: 通过对神狐海域沉积物组分与水合物成藏关系的研究, 得到 SH7B 孔含水合物层(155~177 m)有孔虫丰度以及有孔虫壳体微结构与水合物饱和度的关系。结果表明, 有孔虫丰度与水合物饱和度有良好的对应关系, 有孔虫丰度高, 水合物饱和度也高; 反之亦然。有孔虫丰度与水合物饱和度二者的相关系数为 0.72, 说明有孔虫与水合物的分布和富集有关。扫描电镜研究表明, 有孔虫成岩作用不明显, 有孔虫为有效孔隙, 有孔虫独特的壳体结构增加了沉积物的孔隙空间, 有利于水合物的储存和富集。大部分有孔虫壳体大小相当于砂粒级, 它的存在一方面增加沉积物粗组分砂的含量, 另一方面增加沉积物的孔隙度。沉积物中生物组分——有孔虫, 是南海神狐海域水合物富集的重要因素之一。

关键词: 有孔虫; 饱和度; 水合物; 沉积物; 南海。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2013)05-0907-09

收稿日期: 2012-12-27

Relations between Biogenic Component (Foraminifera) and Highly Saturated Gas Hydrates Distribution from Shenhu Area, Northern South China Sea

CHEN Fang^{1,2}, SU Xin³, LU Hong-feng^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}, ZHUANG Chang^{1,2}

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources of Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China

3. School of Marine Geosciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Based on studies of sedimentary features in the sediment interval containing high-saturation gas hydrate(HS-GHZ) in the Shenhu area, this paper presents results of Shenhu gas hydrates drilling site SH7B, at which HS-GHZ is observed at two major sediment intervals; between 155 and 166 m, and between 172 and 177 m. Our results suggest that the fine-grained sediments are foraminifera-contained clayey silt and silt; with very few siliceous microfossils. Two sediment intervals with high abundance of foraminifera coincide with two intervals of HS-GHZs, with high correlation coefficient up to 72%. Scanning electron microscope analysis on microstructure of sediments shows that existing of abundant sand-sized foramineral shells makes obvious contribution to the increase of sand fraction in these sediment intervals and shell-room space of foraminifers (intra-frame pore space) are significantly larger than pore space between silt-sized grains (inter-particle pore space). Only a few numbers of foraminiferal shell-rooms are filled with fine silt- or clay-sized grains or pyrites, suggesting slight influence of post-sedimentary diagenesis on foraminifera shells. In addition, shell-room spaces of foraminifers are generally in round-form with smooth pore-walls, which surely increases volume-containing capability in comparison with irregular and same diameter-sized inter-particle pore space. These evidences suggested that abundant foraminifers do not only increase in porosity of fine-grained sediments, but also provide high volume-containing capability of pore spaces for accumulating of gas hydrate in those two HS-GHZs at site SH7B. Furthermore, HS-GHZs are also well correlated to abundant foraminiferal intervals at two adjacent gas hydrates obtained sites, e.g. sites SH2B and SH3B, in the Shenhu area. All of these results lead to the assumption and explanation that a large portion of gas hydrates should be stored in shell-room spaces of abundant foraminifers in fine-grained sediment

基金项目: 国家重点基础研究发展研究规划项目(No.2009CB219502); 国土资源部公益性行业科研基金项目课题(No.2008110140202); 国家专项项目课题(No.GZH2011003050602)。

作者简介: 陈芳(1966—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事微体古生物学和水合物研究。E-mail: Zhchenfang66@21cn.com

layers in Shenhu area, which are different from the results obtained by ODP gas hydrate drillings; and existence of abundant foraminifera is an important sedimentary factor for controlling accumulation and storage of high saturation of gas hydrates in Shenhu area.

Key words: foraminifera; saturation; gas hydrates; sediments; South China Sea.

天然气水合物是以甲烷为主的烃类气体分子与水分子结合形成的一种冰状固态物质,主要分布于陆地永久冻土带和水深大于 300 m 的海底陆坡沉积物中.作为一种非常规的天然气矿藏,水合物成藏主要取决于温度、压力、气体组分和饱和度及孔隙水,其结晶和生长还取决于沉积物颗粒大小、形状和组成(Clennell *et al.*, 1999).因此,水合物的形成与分布除了需要特定的温压条件外,还需要合适的沉积条件以提供充足的气源和良好的储集空间,其中储集空间与岩性密切相关.海洋天然气水合物主要分布在晚中新世以来的沉积物中或海底(Paull *et al.*, 1996; Tréhu *et al.*, 2003),按成因划分为聚集型(focused, high-flux gas hydrate, FHF)和分散型(distributed, low-flux gas hydrate, DLF)两类(Tréhu *et al.*, 2006).FHF 型水合物呈块状,多赋存于海底附近,而 DLF 型水合物呈分散状赋存于沉积物中.南海神狐海域水合物为 DLF 型水合物(Zhang *et al.*, 2007).据统计,分布在晚中新世以来沉积物中的 DLF 型水合物饱和度变化较大,典型海区内水合物脊水合物的饱和度为 2%~30%(Torres *et al.*, 2004; Tréhu *et al.*, 2004);与南海同处在被动大陆边缘的布莱克海台水合物饱和度为 3.3%~5.8%(Collett and Ladd, 2000).而南海神狐海域水合物饱和度高达 20%~48%(Zhang *et al.*, 2007),这在世界海域沉积物中的水合物饱和度中属高含量区.沉积物是水合物的载体,其粒度和组分是影响天然气水合物富集的主要因素(Tréhu *et al.*, 2003).一般地,沉积物越粗,水合物饱和度越高,这一点在实验和实际取样中都得到了证实(Bünz *et al.*, 2003; Tréhu *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2004).南海神狐海域水合物的富集同样遵循该规律,粗粒沉积物砂、粗粉砂含量高的层位与水合物饱和度高的层位呈良好的对应关系,沉积物的粒度是水合物富集的重要控制因素之一(陈芳等, 2011).但南海神狐海域含水合物的沉积物相对偏细,砂含量偏低(不到 10%),而水合物饱和度如此高,说明除沉积物粒度外还有其他因素影响水合物的富集.为此,本文开展南海神狐海域含水合物层沉积物中生物组分有孔虫的研究,探讨其与高饱和度水合物的关系.

1 研究区地质概况

南海北部神狐海域水合物钻探区位于白云凹陷水深 1 000~1 500 m 的陆坡区.白云凹陷位于珠江口盆地的珠二坳陷,处于南海北部大陆边缘陆坡区,水深 200~3 000 m,新生代最大沉积厚度超过 11 km,是珠江口盆地最大的凹陷,为珠江口盆地的沉降和沉积中心(庞雄等, 2008),是南海深水油气、水合物的主要勘探区.新近纪以来沉积环境演变为陆坡深水环境,主要发育深水浊积扇、滑塌沉积以及峡谷水道这 3 种类型的沉积相(匡增桂和郭依群, 2011),巨厚的深水沉积中含有丰富的海相微体古生物化石.中国前期在该区的有关地质调查结果发现了大量指示天然气水合物存在的地球物理和地球化学等标志(张光学等, 2002),有关沉积学的研究也表明,该区具有良好的天然气水合物成藏的沉积条件(苏新等, 2005).2007 年广州海洋地质调查局(GMGS)首次在该海域实施“中国海域天然气水合物钻探”,并成功钻取天然气水合物样品(Zhang *et al.*, 2007).神狐钻探区海底地形总体趋势为北向南倾斜,地形较复杂,所钻取的最老地层达上中新统,水合物呈分散状赋存于上中新统一下上新统未固结的含钙质粘土质粉砂和含钙质粉砂中,这些矿层富含钙质生物组份有孔虫和钙质超微化石,而硅质组份贫乏,硅藻和放射虫缺失(陈芳等, 2009).

2 取样与方法

所研究的 SH7B 钻孔是广州海洋地质调查局于 2007 年在南海北部陆坡神狐海域实施“中国海域天然气水合物钻探”航次调查期间,由租赁的荷兰辉固公司“Bavenit”号钻探船所获得.取心方式有保压取心和非保压取心两种,保压岩心在到达井口后首先放到位于井口的低温鼠洞中冷却 30 min,然后取下快速送至低温实验室或液氮罐中备用.钻孔取样位置和取样区地形见图 1.本文涉及的样品主要取自 SH7B 孔 155~177 m 的含水合物层,取样数为 13 个,取样间隔 1~5 m.对沉积物进行粒度分析、有孔虫鉴定以及沉积物显微结构分析等.

沉积物粒度分析、有孔虫鉴定方法遵照中华人

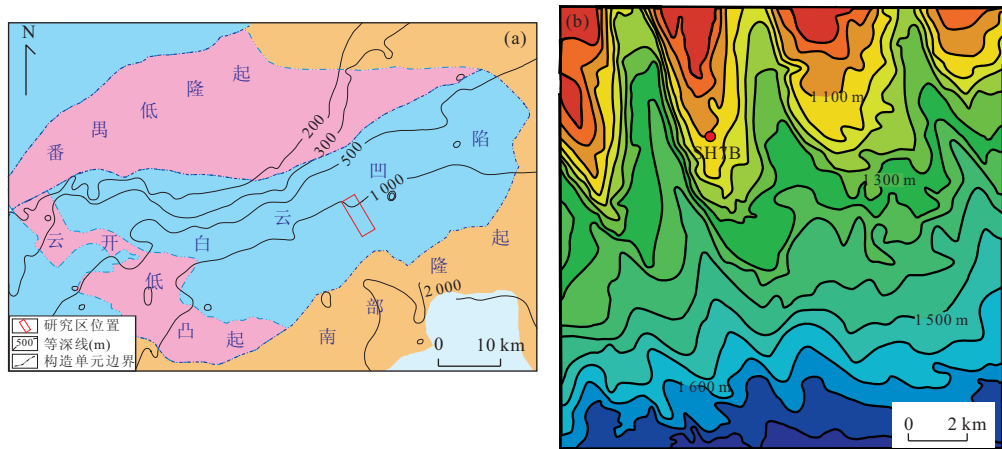


图1 南海北部神狐水合物钻探区构造位置(a)和钻孔位置(b)(据匡增桂和郭依群,2011 修改)

Fig.1 Geography and physiognomy of the gas hydrate sampling (a) and drilling locations (b) in Shenhu area, the northern South China Sea

民共和国国家标准《GB/T 12763.8.6.3-2007 海洋调查规范第八部分:海洋地质地球物理调查》执行.粒度分析采用 Mastersizer2000 型激光粒度仪,为了获得原始总体的粒度特征,对样品采用全样分析,不去钙.用于有孔虫鉴定的样品干重为 40 g,将样品置于烧杯后,不加任何化学分散剂,在自来水中浸泡 1~2 d 至完全散开,水洗过 250 目的铜筛(孔径为 0.063 mm),60 ℃ 烘干,再用 100 目(孔径 0.154 mm)的铜筛干筛粗组分,对 >0.154 mm 的有孔虫进行鉴定统计,所用光学显微镜型号为 Leica 165C.以上工作在广州海洋地质调查局实验测试所完成.

沉积物微结构观测的原位制片工作在中国科学院广州地化所完成,其方法如下:用手术刀先将含水的沉积物样品切割成 3.0 cm(长)×2.0 cm(宽)×0.5 cm(厚)的薄片状,将其置于真空冷冻干燥机的托盘中干燥 24~48 h;将干燥后的沉积物片置于耐高温的胶中煮沸 1~2 h;将沉积物片取出,让其自然冷却;冷却后的沉积物片已坚硬如石;最后将煮过胶的沉积物片按普通岩石的制片方法磨制成供光学显微镜观察的薄片和供扫描电子显微镜研究其微结构的光薄片.沉积物显微结构研究在广州海洋地质调查局实验测试所完成,扫描电镜仪器型号为捷克产的 Vega II LUM.

3 结果

3.1 含水合物层生物组分与水合物饱和度的关系

SH7B 孔含水合物层富含钙质生物钙质超微化

石和有孔虫,而硅质生物放射虫、硅藻极度贫乏.有孔虫个体相对较大,主要相当于砂粒级.SH7B 孔砂组分中有孔虫含量占 32.0%~98.4%,平均含量 65.5%.根据沉积物粒度分析和有孔虫丰度的统计,SH7B 孔含水合物层中砂、碳酸钙、有孔虫含量与水合物饱和度有良好的对应关系.由于砂、碳酸钙的主要来源是有孔虫,说明沉积物中的有孔虫含量与水合物饱和度有良好的对应关系,高饱和度水合物主要集中在富含孔虫的层位(图 2).总体上,有孔虫丰度高,水合物饱和度也高,反之亦然.有孔虫(大于 0.154 mm)丰度与水合物饱和度的相关系数(R)为 0.72,碳酸钙与水合物饱和度的相关系数为 0.83(图 3).但有孔虫丰度与水合物饱和度并非完全呈正相关关系,如在 SH7B 孔 172.5 m 附近,有孔虫丰度偏低,但水合物饱和度相对较高.这与该层位有孔虫大量黄铁矿化有关,本文只统计了未黄铁矿化的有孔虫.

此外,选取 SH7B 孔含水合物层饱和度高低的层位(表 1)进行原位沉积物薄片扫描电镜观察研究,发现有孔虫丰度与饱和度基本成正相关,即有孔虫丰度高,水合物饱和度也高.样品 1 水合物饱和度约为 33%,单位面积分布有 26 个有孔虫壳体(图 4a);样品 2 水合物饱和度约为 4%,单位面积仅见 8 个有孔虫壳体(图 4b);样品 3 水合物饱和度约为 13%,单位面积有 17 个有孔虫壳体.

3.2 有孔虫含量不同的水合物样品在水中的分解现象

为了证实有孔虫与水合物饱和度有关,笔者设计了一实验,将有孔虫丰度不同的含水合物样品放

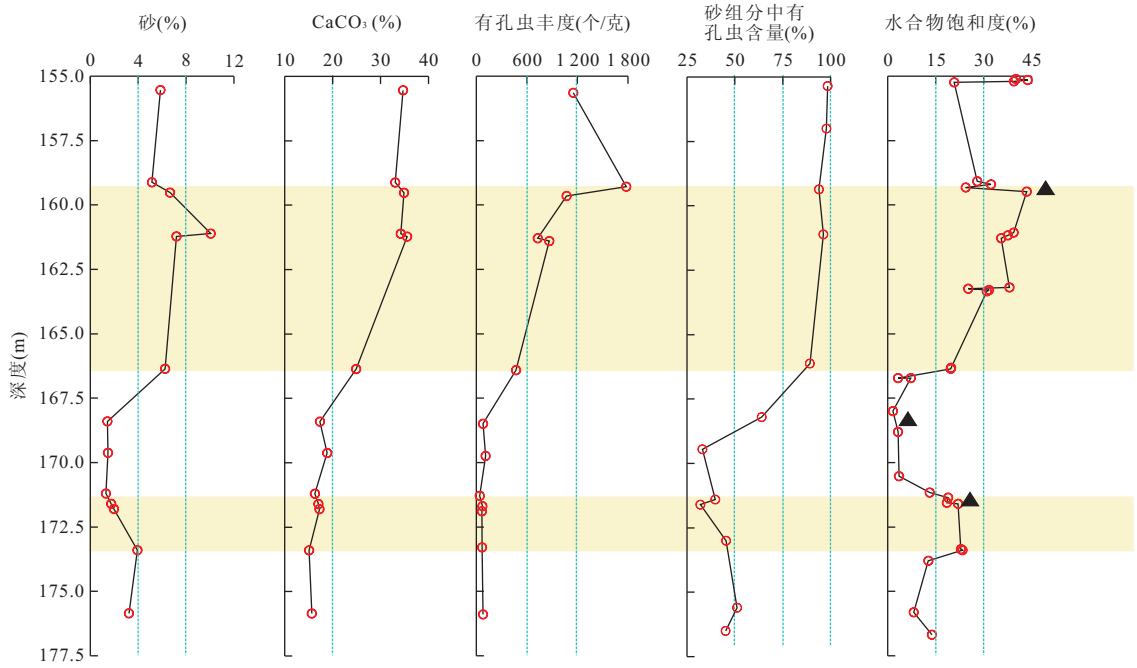


图 2 SH7B 孔含水合物层沉积物组分与水合物饱和度的关系(符号▲表示扫描电镜观察沉积物结构层位)

Fig.2 The relationship between the biogenic components of sediments and the saturations of gas hydrates of core SH7B

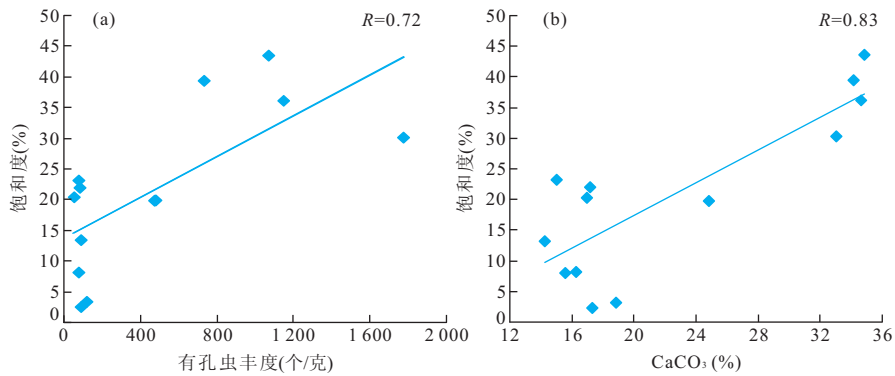


图 3 SH7B 孔含水合物层有孔虫丰度、碳酸钙含量与水合物饱和度相关性分析

Fig.3 Plots of hydrate saturation vs. foraminifera abundance (a) and hydrate saturation vs. content of CaCO₃ (b)

表 1 SH7B 孔含水合物层样品有孔虫丰度与水合物饱和度的相关信息(扫描电镜)

Table 1 The relationship between gas hydrate saturation and foraminifera abundance in core SH7B

| 样品号 | 样品深度 (cm) | 有孔虫丰度 (个/单位面积) | 水合物饱和度 (%) |
|-----|---------------|----------------|------------|
| 1 | 15 924~15 929 | 26 | 33 |
| 2 | 16 835~16 840 | 8 | 4 |
| 3 | 17 352~17 357 | 17 | 13 |

水中未见明显水合物分解气体柱(图 5b),该样品水合物饱和度约为 15%;有孔虫丰度为 525 个/克的样品 2 在水中见明显水合物分解气体柱(图 5d),该样品水合物饱和度高达 40%。上述实验说明有孔虫丰度与水合物饱和度有关,有孔虫丰度高,水合物饱和度也高,反之亦然。

4 讨论

4.1 生物组分与水合物的成藏

水合物的形成与分布除了需要特定的温压条件

入水中观察其现象,将从液氮罐中取出的含水合物的保压取心样品 1(图 5a)和样品 2(图 5c)分别置于水中,结果表明有孔虫丰度为 112 个/克的样品 1 在

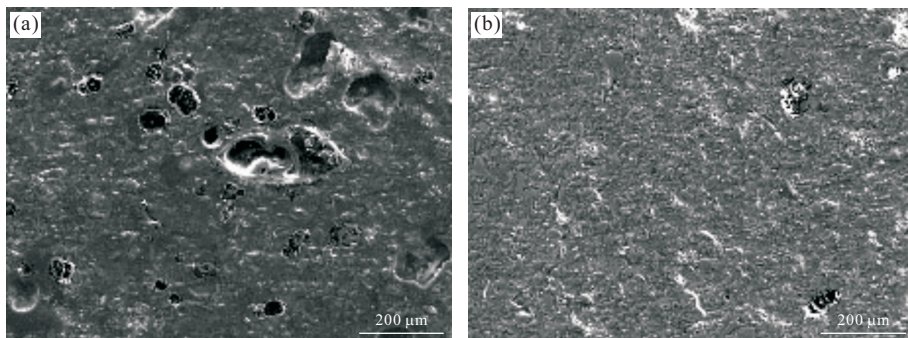


图4 水合物饱和度高的样品1(a)与水合物饱和度低的样品2(b)中的有孔虫数量及分布(扫描电镜照片)

Fig.4 Foraminifera abundance in high hydrate saturation sample (a) and low hydrate saturation sample (b), showing a different abundance (SEM images)

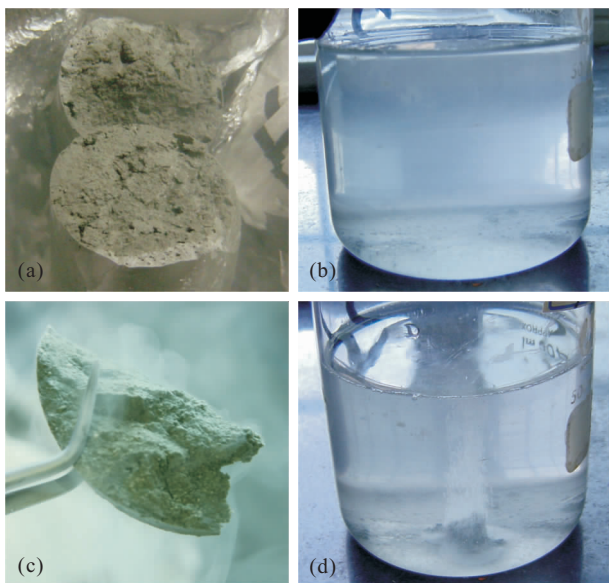


图5 有孔虫含量不同的含水合物样品在水中的分解现象
Fig.5 Gas hydrate dissociation from sediments with different foraminifera contents

a.岩心沉积物样品1(有孔虫丰度112个/克);b.岩心沉积物样品1在水中未见明显水合物分解气体柱,说明水合物饱和度低;c.岩心沉积物样品2(有孔虫丰度525个/克),有孔虫颗粒肉眼可见;d.岩心沉积物样品2在水中剧烈分解,形成明显的气体柱,说明水合物饱和度高

外,更需要合适的沉积条件,以提供充足的气源和良好的储集空间,其中储集空间与岩性(粒度和组分)密切相关。目前,对于沉积物中生物组分含量变化与水合物赋存沉积条件关系研究相对较少,只有少数报道涉及这个问题(Kraemer *et al.*, 2000; Bahk *et al.*, 2011)。大洋钻探164航次在布莱克海台的钻探发现,水合物稳定带层段中含较丰富的硅藻化石;韩国东海郁龙(Ulleung)盆地某钻孔某层位的分散型水合物储层砂含量仅为0.5%~2.2%,水合物饱

和度高达34.7%~43.0%,涂片发现沉积物中以硅质生物(硅藻)为主,其次为钙质生物,推测这些具有多孔微结构硅藻的存在提高了沉积物的孔隙率,给水合物在该层段的形成和分布提供了有利的沉积条件(Bahk *et al.*, 2011)。而南海神狐水合物储层砂平均含量为1.40%~4.24%,富含钙质生物组分(有孔虫和钙质超微化石),硅质组分贫乏,蛋白石含量几乎为零。但不管以哪种生物组分为主,布莱克海台、韩国东海和南海神狐钻探区的水合物层都有一个共性,即水合物饱和度与生物含量组分呈良好的对应关系。在南海神狐有孔虫丰度高,水合物饱和度也高,反之亦然;在韩国东海硅藻丰度高,水合物饱和度也高,反之亦然。究其原因,发现与有孔虫、硅藻等生物的结构有关,这些生物本身具有孔隙结构,它们的存在能增加沉积物的孔隙度,还能为水合物的形成提供成核空间。

4.2 有孔虫的成岩作用与孔隙的有效性

有孔虫主要是生活在海洋的单细胞原生动动物,死亡后,它们的介壳落至海底成为海洋沉积物的重要组成部分。对于深海沉积以及开放或受限的陆架、陆坡而言,有孔虫都是主要的造岩要素。在某些情况下,每立方米沉积物中有孔虫的含量可达上万个个体。在南海神狐含水合物层,大于0.154 mm粒级的有孔虫平均丰度为525个/克,最高可达1800个/克(陈芳等, 2009)。

有孔虫介壳的大小通常从不到0.1 mm到1.0 mm,化石最大者长近20 cm,主要相当于砂级和粗粉砂级。有孔虫尤其是浮游有孔虫,介壳包含许多空的房室,它们通过隔壁相互分开,隔壁上具有细小的开口(列孔, foramina),最后一个房室有一个或多个对外开口(室口/壳口, apertures)。神狐海域含水合物层97%以上的有孔虫为浮游有孔虫。鉴于有

孔虫壳体的独特性,每个有孔虫壳体即可成为一个孔隙空间.由于南海神狐海域水合物层埋深较大(海底以下 155~230 m),有孔虫可能受到早期成岩作用的影响,从而孔隙的有效性也受到影响.为此,挑出含水合物层有孔虫在显微镜下观察.光学显微镜下有孔虫壳体干净,部分破损,未发现明显的重结晶,扫描电镜下可清晰地看到有孔虫壳体上的壁孔,说明后期成岩作用微弱.南海 ODP1148 孔有孔虫成岩明显出现在孔深 477 m 之下(房殿勇等,2005),而 SH7B 孔水合物层埋深较 1148 孔有孔虫成岩作用明显的层位浅得多,据此亦可推测水合物层有孔虫成岩作用相对较弱,成岩作用对有孔虫壳体影响不大.此外,有孔虫壳体埋藏后,由于与周围沉积物孔隙水之间存在离子浓度差,钙质壳体发生溶解并与孔隙水进行离子交换,从而导致壳体同位素记录受到不同程度的改造,成岩作用对有孔虫壳体同位素的影响主要表现在氧同位素上,使有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻(同济大学海洋地质系,1989).SH7B 孔水合物层有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值未见明显变轻(陈芳等,2010),说明后期成岩作用微弱.同样地,含水合物层原位沉积物薄片扫描电镜研究表明,有孔虫后期成岩作用微弱,少部分有孔虫个别房室被周围沉积物充填或被自生黄铁矿充填,未充填房室壁孔清晰可见(图 6).大部分有孔虫壳体房室未被周围沉积物充填或未出现成岩现象,部分有孔虫被黑色物质所充填,成分分析谱图显示充填物由 Cl、C 和 O 组成(图 7),这是后期薄片制作时所使用的胶状物,说明有孔虫原来的房室是空的.

上述含水合物层中的有孔虫个体的显微镜观

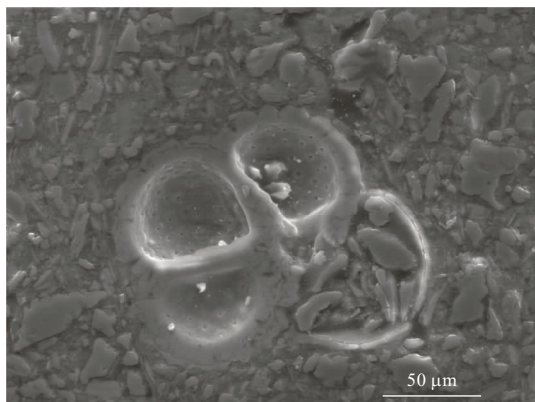


图 6 SH7B 孔含水合物层 16 835~16 840 cm 有孔虫显微结构(有孔虫大部分房室未被充填)

Fig.6 Foraminifera microstructure at the interval between 16 835—16 840 cm in core SH7B

察、原位沉积物薄片扫描电镜研究以及有孔虫壳体氧同位素的综合分析表明,南海神狐海域水合物的“宿主”沉积物即储层中的有孔虫成岩作用微弱,有孔虫壳体只是部分被沉积物充填或黄铁矿化,几乎每个有孔虫壳体就是一个有效的孔隙,可为水合物的形成提供储存空间.

4.3 有孔虫与水合物的成藏

如前所述,南海神狐海域水合物呈分散状赋存于沉积物中,属分散型水合物(DLF 型).该种类型的水合物肉眼难以分辨,其岩心与正常岩心没有明显区别,但放入水中会产生气泡或气柱.既然是分散型水合物,其形成和富集除了受温压和气体通量的影响外,还明显受沉积物组成、孔隙类型和大小的影响.南海神狐水合物钻探区所钻获的含水合物沉积物还未完全压实固结,其组分主要由陆源碎屑矿物、生物碳酸盐和粘土矿物组成.碎屑矿物种类比较单一,主要以石英、长石为主,生物碳酸盐主要由有孔虫和钙质超微化石组成(陆红锋等,2009).其中生物碎屑有孔虫较粗,是砂级和粗粉砂级沉积物的主要组成部分,而陆源碎屑石英、长石等则是粉砂级主要组成部分.沉积孔隙的类型应该以粗碎屑颗粒相互接触形成的原始粒间孔隙为主,即有孔虫颗粒之间的孔隙、有孔虫颗粒与石英或长石颗粒之间的孔隙、石英与长石颗粒间的孔隙组成.此外,还有黏土颗粒间的孔隙.但与实心的陆源碎屑石英、长石等颗粒不同的是,生物碎屑有孔虫除了可提供粒间孔隙外,由于其壳体的独特性和成岩作用的微弱性还可以提供粒内孔隙(图 8),即有孔虫的房室空间.而且,由于有孔虫颗粒较大,其所提供的粒内孔隙比粒间孔隙要大得多.由此推测,南海神狐海域水合物主要形成于以上所述的粒间孔隙和粒内孔隙中,并主要富集在有孔虫提供的粒内孔隙中,甲烷气(CH_4)和水通过有孔虫最后一个房室的壳口和壳体上的壁孔进入有孔虫后,再通过各房室隔壁上细小的开口充填各房室,在适当的温度和压力条件下即可形成水合物(图 8).由于粒内孔隙比粒间孔隙大得多,因此,在水合物赋存层位沉积物岩性相同的情况下,有孔虫丰度越高,粒内孔隙越高,孔隙空间越大,水合物的富集程度也越高.这就是南海神狐海域高饱和度水合物主要集中在有孔虫含量高的层位的原因,也是含水合物层沉积物相对偏细,但水合物饱和度很高的原因之一.

此外,推测南海水合物的产状(分散状)也与有孔虫的分布有关.有孔虫随机分散在沉积物中,而水

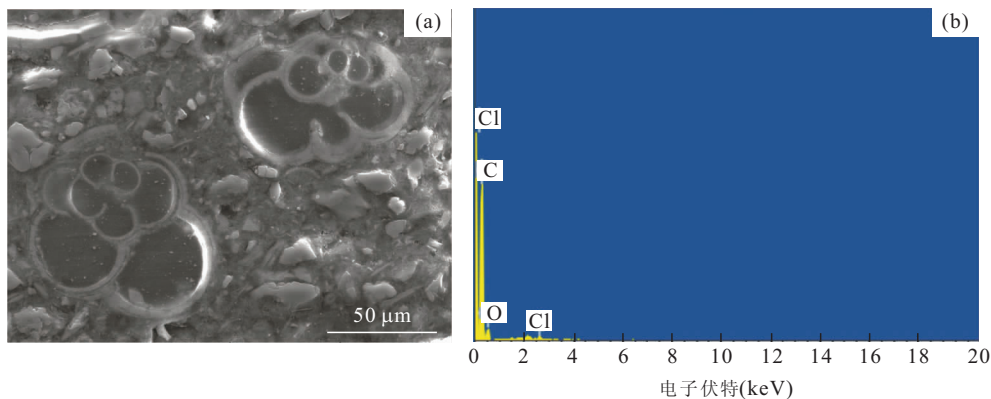


图7 SH7B孔含水合物层 15 924~15 929 cm 有孔虫房室充填物(a)及其成分分析谱图(b)

Fig.7 Foraminifera microstructure at the interval between 15 924—15 929 cm in core SH7B, the rooms were filled (a) and the energy dispersive X-ray spectrometry of the fillings (b)

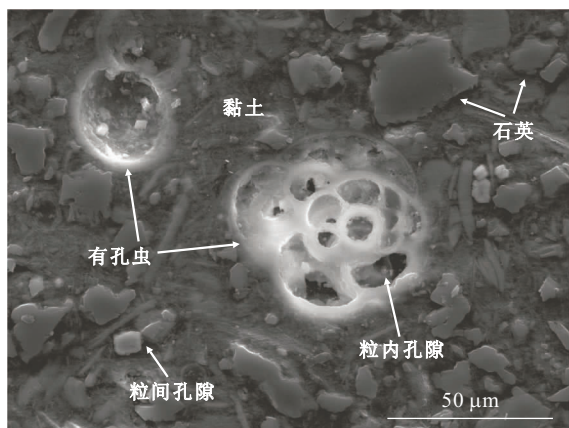


图8 SH7B孔含水合物层沉积物主要颗粒组成和孔隙类型(原位薄片观察)

Fig.8 SEM image of gas hydrate-bearing sediments in core SH7B

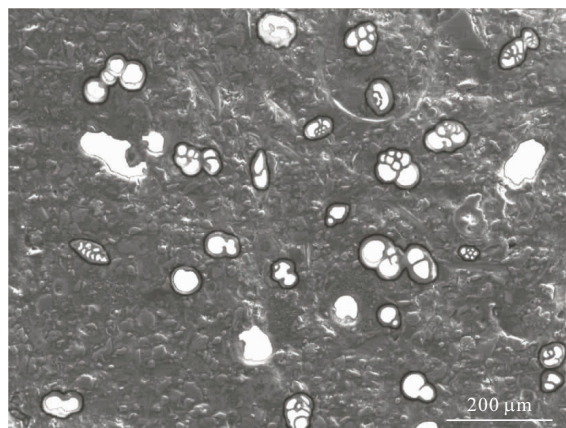


图9 SH7B孔 15 924~15 929 cm 层段水合物(有孔虫房室内白色物)产状示意图

Fig.9 Gas hydrate occurrence at the interval between 15 924—15 929 cm in the sediments of core SH7B

合物主要储存在有孔虫壳体中,孔隙空间有限且呈分散状,因而水合物随之呈分散状出现在沉积物中(图9)。

5 结论

南海神狐海域水合物饱和度与沉积物中有孔虫丰度呈正相关.有孔虫丰度高,水合物饱和度也高,反之亦然.说明神狐海域水合物的形成与富集与有孔虫有关.

含水合物沉积物中的有孔虫成岩作用微弱,有孔虫壳体中的房室几乎未被其他物质充填,每个有孔虫壳体就是一个有效的孔隙空间,有孔虫的存在增加了沉积物孔隙空间.

沉积物中除了颗粒与颗粒之间的粒间孔隙外,

还存在颗粒内的粒内孔隙,粒内孔隙主要存在于有孔虫壳体中.有孔虫丰度越高,粒内孔隙越多,沉积物中的孔隙空间越大,水合物的富集程度也越高.南海神狐海域高饱和度水合物主要集中在有孔虫含量高的层位,说明有孔虫壳体提供的粒内孔隙更有利于水合物的形成和富集.南海神狐海域水合物大部分形成与富集在有孔虫壳体提供的粒内孔隙中.

有孔虫壳体大小主要相当于砂粒级,有孔虫的存在一方面增加沉积物粗组分砂的含量,另一方面增加沉积物的孔隙度.因此,生物组分有孔虫是南海神狐海域水合物富集的重要因素之一.

致谢:“中国海域天然气水合物钻探”航次科学家们为本研究样品的获取付出了辛勤劳动;沉积物薄片制片工作在中山大学海洋学院王江海教授的帮助下完成,在此表示感谢.

References

- Bahk, J. J., Kim, D. H., Chun, J. H., et al., 2011. Gas Hydrate Occurrences and Their Relation to Hosting Sediment Properties; Results from UBGH2, East Sea. Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates, Edinburgh, Scotland, United Kingdom.
- Bünz, S., Mienert, J., Berndt, C., 2003. Geological Controls on the Storegga Gas-Hydrate System of the Mid-Norwegian Continental Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(3–4): 291–307. doi: 10.1016/s0012-821x(03)00097-9
- Chen, F., Su, X., Zhou, Y., et al., 2009. Variations in Biogenic Components of Late Miocene-Holocene Sediments from Shenhu Area in the Northern South China Sea and Their Geological Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Zhou, Y., Su, X., et al., 2010. Benthic Foraminifera and Stable Isotopic Composition of Gas Hydrate-Bearing Sediments from Shenhu Area in The Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Zhou, Y., Su, X., et al., 2011. Gas Hydrate Saturation and Its Relation with Grain Size of Gas Hydrate-Bearing Sediments in the Shenhu Area of Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(5): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- Clenell, M. B., Hovland, M., Booth, J. S., et al., 1999. Formation of Natural Gas Hydrates in Marine Sediments: 1. Conceptual Model of Gas Hydrate Growth Conditioned by Host Sediment Properties. *Journal of Geophysical Research*, 104(B10): 22985–223003.
- Collett, T. S., Ladd, J., 2000. Detection of Gas Hydrate with Down Hole Logs and Assessment of Gas Hydrate Concentrations (Saturations) and Gas Volumes on the Blake Ridge with Electrical Resistivity Log Data. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 164: 179–191.
- Department of Marine Geology, 1989. Introduction to Paleocceanography. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Fang, D. Y., Zhao, Q. H., Cheng, X. R., et al., 2005. Diagenetic Influence on the Foraminiferal Oxygen Isotope Record. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2): 63–66 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. F., Chen, H., Chen, F., et al., 2009. Mineralogy of Sediments from Gas-hydrate Drilling Sites, Shenhu Area, South China Sea. *Research of Geological South China Sea*, 28–39 (in Chinese with English abstract).
- Kraemer, L. M., Owen, R. M., Dickens, G. R., 2000. Lithology of the Upper Gas Hydrate Zone, Blake Outer Ridge, a Link between Diatoms, Porosity, and Gas Hydrate. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 164: 229–236.
- Kuang, Z. G., Guo, Y. Q., 2011. The Sedimentary Facies and Gas Hydrate Accumulation Models since Neogene of Shenhu Area, Northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 914–920 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H., Wright, F., Okui, T., et al., 2004. Sediment Control on Hydrate Occurrence in Natural Sediments from Experimental Results. AAPG Hedberg Research Conference, Natural Gas Hydrates; Energy Resource Potential and Associated Geological Hazards, Vancouver, Canada.
- Pang, X., Chen, C. M., Peng, D. J., et al., 2008. Basic Geology of Baiyun Deep Water Area in the Northern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 20(4): 215–222 (in Chinese with English abstract).
- Paull, C. K., Matsumoto, R., Wallace, P. J., et al., 1996. Proceedings of the Ocean Drilling Program Leg 164, Initial Reports. Ocean Drilling Program, College Station, Texas.
- Su, X., Chen, F., Yu, X. H., et al., 2005. A Pilot Study on Miocene through Holocene Sediments from the Continental Slope of the South China Sea in Correlation with Possible Distribution of Gas Hydrates. *Geoscience*, 19(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Torres, M. E., Wallmann, K., Tréhu, A. M., et al., 2004. Gas Hydrate Growth, Methane Transport, and Chloride Enrichment at Southern Summit of Hydrate Ridge, Cascadia Margin off Oregon. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(1–2): 225–241. doi: 10.1016/j.epsl.2004.07.029
- Tréhu, A. M., Bohrmann, G., Rack, F. R., et al., 2003. Proceedings of the Ocean Drilling Program Leg 204, Initial Reports. Ocean Drilling Program, College Station, Texas.
- Tréhu, A. M., Long, P. E., Torres, M. E., et al., 2004. Three-Dimensional Distribution of Gas Hydrate beneath Southern Hydrate Ridge: Constraints from ODP Leg 204. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(3–4): 845–862. doi: 10.1016/j.epsl.2004.03.035
- Tréhu, A. M., Ruppel, C., Holland, M., et al., 2006. Gas Hydrates in Marine Sediments; Lessons from Scientific Ocean Drilling. *Oceanography*, 19(4): 124–142. doi: 10.5670/oceanog.2006.11
- Zhang, G. X., Huang, Y. X., Zhu, Y. H., et al., 2002. Prospect

of Gas Hydrate Resources in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 75-87 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. Q., Yang, S. X., Wu, N. Y., et al., 2007. China's First Gas Hydrate Expedition Successful, "Fire in the Ice". Methane Hydrate Newsletter of the U. S., Department of Energy.

附中文参考文献

陈芳, 苏新, 周洋, 等, 2009. 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特征及意义. *海洋地质与第四纪地质*, 29(2): 1-8.

陈芳, 周洋, 苏新, 等, 2010. 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. *海洋地质与第四纪地质*, 30(2): 1-8.

陈芳, 周洋, 苏新, 等, 2011. 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. *海洋地质与第四纪地质*,

31(5): 95-100.

房殿勇, 赵泉鸿, 成鑫荣, 等, 2005. 钙质成岩作用对有孔虫氧同位素的影响. *海洋地质与第四纪地质*, 25(2): 63-66.

陆红锋, 陈弘, 陈芳, 等, 2009. 南海神狐海域天然气水合物钻孔沉积物矿物学特征. *南海地质研究*, 28-39.

匡增桂, 郭依群, 2011. 南海北部神狐海域新近系以来沉积相及水合物成藏模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(5): 914 - 920.

庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等, 2008. 南海北部白云深水区之基础地质. *中国海上油气*, 20(4): 215-222.

苏新, 陈芳, 于兴河, 等, 2005. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探. *现代地质*, 19(1): 1-13.

同济大学海洋地质系, 1989. *古海洋学概论*. 上海: 同济大学出版社.

张光学, 黄永祥, 祝有海, 等, 2002. 南海天然气水合物的成矿远景. *海洋地质与第四纪地质*, 22(1): 75-81.