

doi:10.3799/dqkx.2016.033

南海东北部陆坡天然气水合物钻探区 生物地层与沉积速率

陈芳¹, 庄畅¹, 周洋¹, 苏新², 段焯¹, 刘广虎¹, 吴聪¹, 荆夏¹

1. 广州海洋地质调查局, 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510075

2. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

摘要: 2013年我国首次在南海东北部东沙陆坡实施天然气水合物钻探, 并获取块状等可视天然气水合物样品. 为了解钻区地层、天然气水合物产出带(the zone of gas hydrate occurrence)或天然气水合物储层的地层时代和沉积速率特征, 对其中5个站位(GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09和GMGS16)的岩心沉积物进行钙质超微化石、有孔虫生物地层学和沉积速率变化的研究. 钻孔取心最大深度为213.55 m, 共识别出第四纪中更新世以来3个钙质超微化石事件和2个有孔虫事件, 确定了钻探区所钻达最老地层为中更新统; 天然气水合物产出带的地层时代为中更新世—全新世约0.44 Ma以来. 钻区0.12 Ma以来的沉积速率介于36.9~73.3 cm/ka之间, 平均值高达54.2 cm/ka, 0.44 Ma以来平均沉积速率为47.4 cm/ka, 表明东沙海域天然气水合物钻探区位于一高沉积速率堆积体上, 高沉积速率更有利于天然气水合物的成藏, 该结论与前人研究结果一致.

关键词: 生物地层; 沉积速率; 中更新世; 天然气水合物钻区; 南海东北部陆坡.

中图分类号: P744.4

文章编号: 1000-2383(2016)03-0416-09

收稿日期: 2015-10-22

Calcareous Nannofossils and Foraminifera Biostratigraphy on the Northeastern Slope of the South China Sea and Variation in Sedimentation Rates

Chen Fang¹, Zhuang Chang¹, Zhou Yang¹, Su Xin², Duan Xiao¹, Liu Guanghu¹, Wu Cong¹, Jing Xia¹

1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geologic Survey, Guangzhou 510075, China

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

Abstract: Middle Pleistocene to Holocene calcareous nannofossils and foraminifera biostratigraphy in 5 sites (GMGS05, GMGS07, GMGS08, GMGS09 and GMGS16) from the Dongsha gas hydrate drilling area of the northeastern South China Sea have been studied. A total of 3 nannofossils events and 2 foraminifera events from middle Pleistocene to Holocene were recognized. The oldest sediments recovered are in an age of middle Pleistocene, younger than 0.50 Ma, the age assigned for gas hydrate occurrence zone is middle Pleistocene to Holocene in sites GMGS05, GMGS07, GMGS08 and GMGS16. Sedimentation rates varied from 36.9 cm/ka to 73.3 cm/ka, and reaching the highest average value 54.2 cm/ka since 0.12 Ma in the Dongsha gas hydrate drilling area. The mean sedimentation rate has been 47.4 cm/ka since 0.44 Ma. The results suggested that the gas hydrate drilling area is located at sedimentary body with high sedimentation rate, which is advantageous to gas hydrate formation. This conclusion is consistent with the previous research.

Key words: biostratigraphy; sedimentation rate; middle Pleistocene; gas hydrate drilling area; northeastern slope of South China Sea.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41372012); 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天然气水合物研究. E-mail: Zhchenfang66@21cn.com

引用格式: 陈芳, 庄畅, 周洋, 等, 2016. 南海东北部陆坡天然气水合物钻探区生物地层与沉积速率. 地球科学, 41(3): 416-424.

2013年6—9月期间,国土资源部中国地质调查局(CGS)、广州海洋地质调查局(GMGS)与辉固国际集团、英国 GEOTEK 合作使用 M/V REMEDATIVE 钻探船,对南海北部实施第2次天然气水合物钻探(GMGS2),在紧邻珠江口盆地东部的台西南盆地中部隆起附近地区水深 664~1 420 m 范围内钻探 13 个站位(张光学等,2014),钻取岩心最大深度约 213.55 m. 该航次获取了大量的层状、块状、结核状、脉状及分散状等多种类型的天然气水合物实物样品,甲烷气体含量超过 99% (Zhang *et al.*, 2014). 为确定钻区地层、天然气水合物产出带的地层时代和沉积速率特征,为钻区的资源评价和今后南海天然气水合物的勘探提供基础地质依据,航次后笔者对其中 5 个站位(GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16)所钻取岩心沉积物展开钙质超微化石、有孔虫生物年代地层学的研究,并探讨沉积速率对天然气水合物成藏的影响.

1 取样与方法

1.1 钻孔位置和取样

南海北部第2次天然气水合物钻探(GMGS2)区位于东北部东沙陆坡区,钻孔取样位置和钻探区地形地貌见图 1(张光学等,2014),所研究的 5 个站位除 GMGS07 外,其他 4 个站位 GMGS05、

GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 均获得天然气水合物实物样品. 鉴于钻探航次实际需要等原因,钻探主要在关键和部分控制层段钻取岩心,本次研究的 5 个站位除 GMGS16 几乎为全取心外,其他站位取心率相对偏低,GMGS07、GMGS08 和 GMGS09 的取心率分别为 32.9%、45.8% 和 33.0%,而 GMGS05 站位的取心率仅有 2.4%. 航次后对各钻孔取心部分以 50~100 cm 为间隔取样,用于钙质超微化石、有孔虫分析鉴定和生物地层学研究. GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 孔分别取得 7 个、27 个、78 个、37 个和 227 个共 376 个样品进行钙质超微化石、有孔虫等分析鉴定.

1.2 样品制作和分析方法

钙质超微化石、有孔虫样品处理依据中华人民共和国国家标准《海洋调查规范:第8部分海洋地质地球物理调查》(GB-T12763.8-2007)进行. 钙质超微化石采用传统的简易涂片法,用清洁干净的牙签取少许沉积物置于载玻片上,加蒸馏水,用牙签充分搅拌后,将粗粒沉积物刮去,使细粒沉积物的悬浮液均匀分布在载玻片上,烤干后,将大小为 22 mm×22 mm 的盖玻片用冷衫胶粘在载玻片上制成固定片. 将制好的片子置于蔡司 Axio Imager A2m 型偏光显微镜下放大 1 000 倍观察鉴定;有孔虫采用过筛水洗法,取沉积物干样 40~60 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

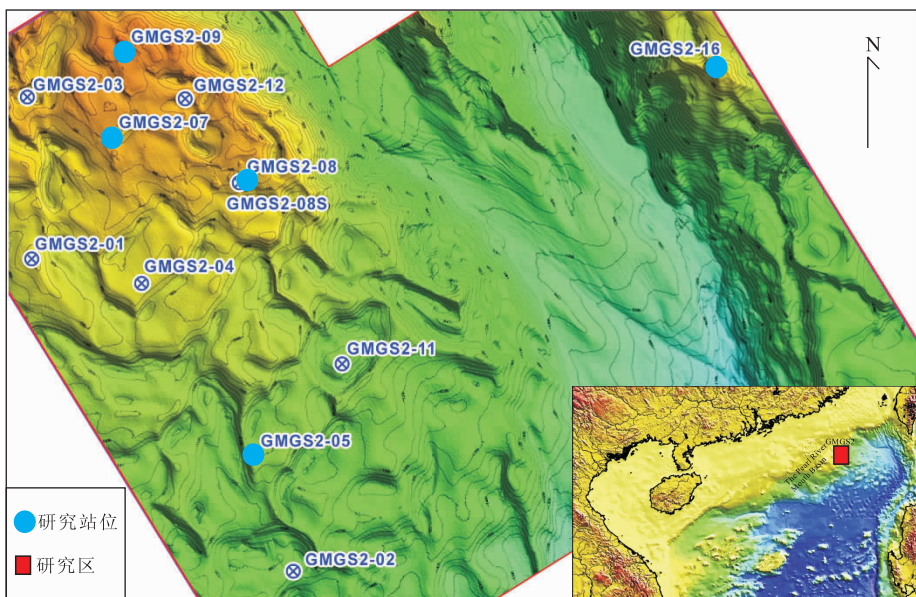


图1 南海东北部天然气水合物钻探区地理位置及钻孔位置

Fig. 1 The geography location and sites location in the Dongsha gas hydrate-drilling area of SCS

据张光学等(2014)

至完全散开,水洗过 250 目的铜筛(孔径为 0.063 mm),60 °C 烘干,称重;再用 100 目(孔径 0.154 mm)的铜筛干筛粗组分供鉴定.上述工作在广州海洋地质调查局实验测试所完成.

对钻孔所取样品进行扫描电镜分析,以确定 *Emiliania huxleyi* 的初现面和顶峰带层位.取适量样品加水后用孔径 0.45 μm 、直径 47 mm 的过滤膜过滤,待过滤膜自然干燥后,用剪刀剪下一小块用双面胶粘到铜桩上.膜的表面镀金,然后放到扫描电镜下放大 6 000 倍观察和统计.每个样品观察和统计 10 个视域,分别统计钙质超微化石总个数及 *Emiliania huxleyi* 的个数,最后算出 *Emiliania huxleyi* 的百分含量.该工作在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.

1.3 年代地层学划分依据

钙质超微化石带的划分采用 Martini(1971)的“标准新生代钙质超微浮游生物地层带”分带方案和 Okada and Budry(1980)分带方案;年代的确定采用 Raffi *et al.* (2006)和 Anthonissen and Ogg(2012)的方案;有孔虫生物带的划分采用 Blow(1979)和 Bolli *et al.* (1985)标准分带方案;年代的确定参照 Li *et al.* (2001, 2005)、李前裕等(2007)和 Anthonissen and Ogg(2012)的方案.本研究只选用了适用于南海的事件和年龄(表 1).新近纪的地质年代依据 Lourens *et al.* (2004)的地质年代表.

表 1 南海中更新世以来钙质超微化石、有孔虫事件及年代
Table 1 Calcareous nannofossils and foraminifera events chronology scheme since Middle Pleistocene in South China Sea

事件	属种	年龄(Ma)
B	Acme <i>Emiliania huxleyi</i>	0.09
T	<i>Globigerinoides ruber</i> (pink)	0.12
B	<i>Emiliania huxleyi</i>	0.29
B	<i>Globigerinoides ruber</i> (pink)	0.40
T	<i>Pseudoemiliania lacunosa</i>	0.44

注: B=Base/FO 初现面(First Occurrence); T=Top/LO 末现面(Last Occurrence).

2 生物地层学

GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 站位钻达最大深度分别为 203.30、74.76、93.84、104.95 和 213.55 m,5 个钻孔的岩性主要为粘土质粉砂夹薄层砾、砾石质砂和砾石质粉砂,陆源物质相当丰富,部分层位钙质超微化石和有孔虫相对较少,同时,各站位大部分钙质超微化石和有孔虫

保存差,尤其是钙质超微化石,给属种的鉴定和地层时代的确定带来较大困难.需要说明是,文中在确定某一生物事件出现深度时,主要采取发现标准带化石和没有发现标准带化石的相邻两个样品之间的中间深度.

2.1 钙质超微化石地层学

通过对这 5 个站位的钙质超微化石地层学分析,共识别出 3 个钙质超微化石生物事件(表 2).3 个钙质超微化石生物事件包括 B Acme *Emiliania huxleyi*、B *Emiliania huxleyi* 和 T *Pseudoemiliania lacunosa* 事件,以及 NN21 和 NN20 等 2 个钙质超微化石生物带,3 个事件代表的年代分别为 0.09、0.29 和 0.44 Ma.

各站位所识别的化石带和事件主要取决于该站位不同层段钻取岩心的间隔和钻达的最大深度,不同站位出现的生物事件有所不同.本次工作中,*Emiliania huxleyi* 的百分含量、初现面和顶峰带的确定主要依据在扫描电镜下观察和统计分析结果(图 2).

GMGS05 站位:取心最大深度为 203.30 m,样品含有丰富的钙质超微化石,丰度介于 169~961 个/10 个视域之间.该站位取样稀少、取样间隔偏大,无法准确界定生物事件界线.所有样品中均发现带化石 *Emiliania huxleyi*,*E. huxleyi* 百分含量在 1.2%~25.4%之间变化.

GMGS07 站位:该钻孔取心最大深度为 74.76 m,钙质超微化石数量较少,丰度为 16~193 个/10 个视域,化石保存中等一差.所有样品中均发现带化石 *Emiliania huxleyi*,*E. huxleyi* 百分含量在 1.3%~55.1%之间变化.

GMGS08 站位:取心最大深度为 93.84 m,除一个样品(取自自生碳酸盐岩层)未见化石外,其他样品都含有数量不等的钙质超微化石,丰度介于 12~913 个/10 个视域之间,化石保存中等一差.所有样品中均发现带化石 *Emiliania huxleyi*,*E. huxleyi* 百分含量变化在 1.6%~40.2%之间变化.

GMGS09 站位:该站位取心最大深度为 104.95 m,钙质超微化石数量较少,丰度介于 16~103 个/10 个视域之间.所有样品中均发现带化石 *Emiliania huxleyi*,*E. huxleyi* 百分含量在 1.2%~19.5%之间变化.

GMGS05、GMGS07、GMGS08 和 GMGS09 站位自下而上都见有带化石 *Emiliania huxleyi*,说明这 4 个站位未到 *E. huxleyi* 的初现面(B *E. huxleyi*),均

表 2 南海东北部天然气水合物钻探区各站位生物事件的深度(mbsf, 海底以下深度)分布
Table 2 The depths of bioevents at sites GMGS05, GMGS07, GMGS08, GMGS09 and GMGS16

生物事件	生物类型	年龄(Ma)	深度(mbsf)				
			GMGS5	GMGS7	GMGS8	GMGS9	GMGS16
B <i>E. huxleyi</i> Acme	钙质超微化石	0.09					44.00
T <i>G. ruber</i> (pink)	有孔虫	0.12	56.27	44.30	67.90	88.00	61.50
B <i>E. Huxleyi</i>	钙质超微化石	0.29	>203.30	>74.76	>93.84	>104.85	167.30
B <i>G. ruber</i> (pink)	有孔虫	0.40					197.60
T <i>P. Lacunose</i>	钙质超微化石	0.44					213.45
钻孔取心最大深度(mbsf)			203.30	74.76	93.84	104.95	213.55

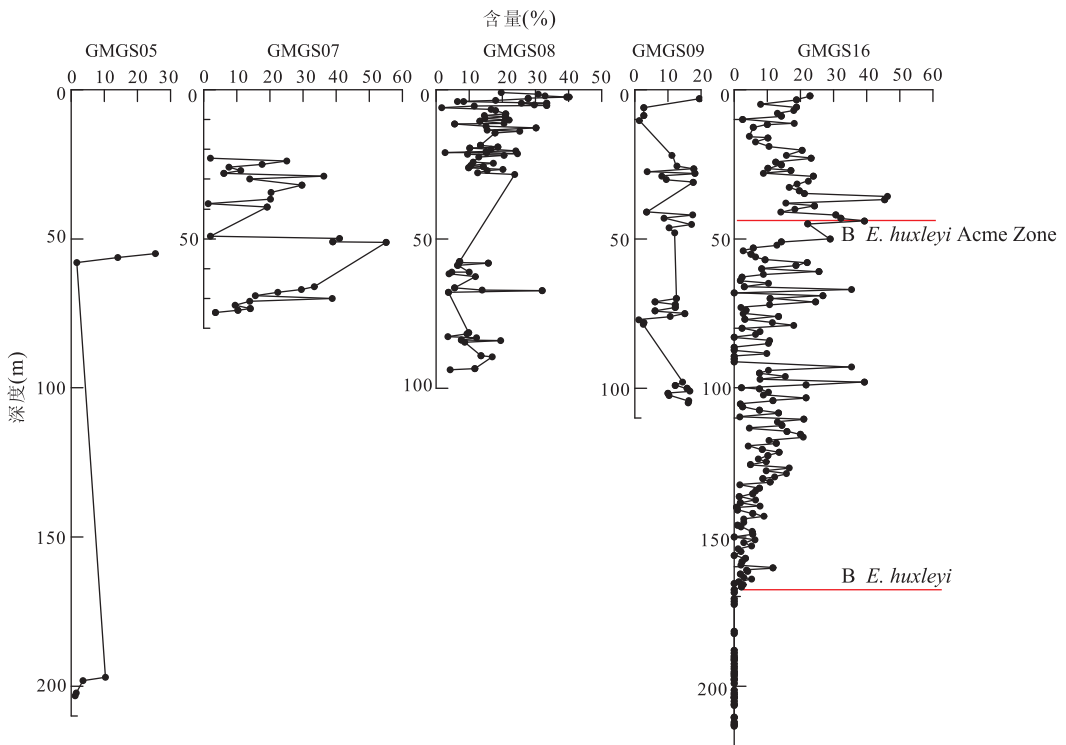


图 2 钻探区各站位带化石 *Emiliana huxleyi* 百分含量及其初现面分布

Fig. 2 Variation in percentage of *E. huxleyi* for 5 sites in the Dongsha gas hydrate-drilling area of SCS

属于 NN21 超微化石生物带,该化石初现面的时代为 0.29 Ma,说明以上钻孔钻达的地层时代小于 0.29 Ma,代表中—晚更新世以来的沉积。

GMGS16 站位:取心最大深度为 213.55 m,钙质超微化石丰度变化范围大,介于 33~1 827 个/10 个视域之间。166.8 m 以上样品中均发现带化石 *Emiliana huxleyi*, *E. huxleyi* 百分含量在 0~46.3% 之间变化。根据 *E. huxleyi* 百分含量的变化,该站位 *E. huxleyi* 顶峰带初现面(B *E. huxleyi* Acme)在 44 m 处,*E. huxleyi* 初现面(B *E. huxleyi*)定在 167.3 m 处,即 0~167.3 m 相当于 NN21

带, *Pseudoemiliana lacunosa* 末现面(T *P. lacunosa*)定在 213.45 m 处,167.3~213.55 m 相当于 NN20 带。 *Pseudoemiliana lacunosa* 末现面的时代为 0.44 Ma,说明钻孔钻达的地层时代在 0.44 Ma 左右。

2.2 有孔虫生物地层学

通过对 5 个站位有孔虫地层学分析,共识别出 T *Globigerinoides ruber*(pink)和 B *G. ruber*(pink) 2 个有孔虫生物事件(表 2)。各站位所识别的化石带和事件主要取决于该站位不同层段钻取岩心的间隔和钻达的最大深度,不同站位出现的生物事件有所

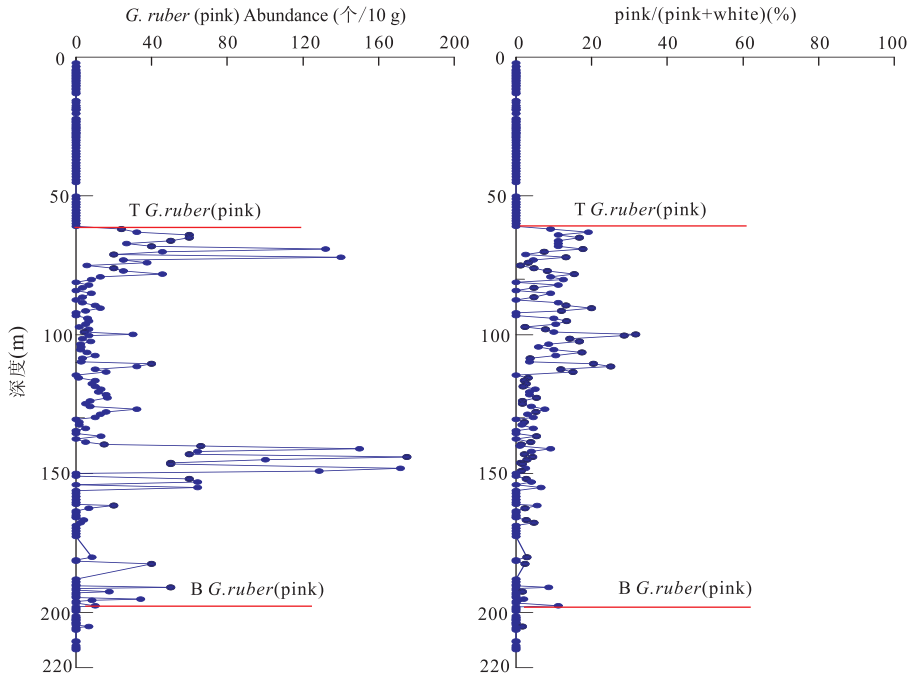


图 3 GMGS16 站位 *Globigerinoides ruber* (pink) 的丰度、百分含量及其初(末)现面分布

Fig. 3 Abundance and percentage of *G. ruber* (pink) in site GMGS16

不同. 浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (pink) 末现面在所有站位中均可识别, GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 站位粉红色 *Globigerinoides ruber* 末现面分别位于 56.27、44.30、67.90、88.00 和 61.50 m 处; 粉红色 *Globigerinoides ruber* 初现面仅在 GMGS16 站位识别出来, 位于 197.60 m 处(图 3), 其他站位如 GMGS07、GMGS08 和 GMGS09 由于钻达最大深度偏浅, GMGS05 站位由于取心率太低而未见或无法识别该事件.

2.3 地层划分和对比

综上所述, 钻探区站位仅钻达中更新统, 下面从老到新对钻孔岩心中所识别的事件、地层划分和钻孔间的对比进行分析.

中更新统(Middle-Pleistocene)

中更新统钙质超微化石仅见 NN20 和 NN21 带.

NN20 带: 以 *P. lacunosa* 末现面(0.44 Ma)为底界、以 *Emiliana huxleyi* 的初现面(0.29 Ma)为顶界. 该带仅在 GMGS16 站位有揭示. GMGS16 站位的 *B Emiliana huxleyi* 位于 167.3 m 处, *T P. lacunosa* (0.44 Ma) 位于 213.45 m, 时代介于 0.29~0.44 Ma 之间. 在该带内 GMGS16 站位还识别出浮游有孔 *G. ruber* (pink) 的初现面(0.40), *B G. ruber* (pink) 位于 197.60 m.

NN21 带: 以 *E. huxleyi* 的初现面(0.29 Ma)

为底界, 该带在 5 个钻孔均有揭示, 但仅在 GMGS16 站位识别出 *B E. huxleyi* 事件, 其他站位均未见 *B E. huxleyi* 事件. 该带内部还可识别出 *Emiliana huxleyi* 的顶峰带, 但由于陆源物质的大量输入稀释了 *E. huxleyi* 的丰度, 因此, *B E. huxleyi* Acme 事件(0.09 Ma)难以识别, 仅 GMGS16 站位识别出来, 位于 44 m 处.

在该带内还识别出浮游有孔虫 *G. ruber* (pink) 的末现面(0.12 Ma), GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 站位的 *T G. ruber* (pink) 事件分别位于 56.27、44.30、67.90、88.00 和 61.50 m 处(图 4).

3 天然气水合物储层的地层年代与沉积速率

3.1 天然气水合物储层地层年代

根据上述钙质超微化石、有孔虫生物地层学的研究结果, GMGS16 站位钻达的最老地层为中更新世, 约 0.44 Ma; GMGS05、GMGS07、GMGS08 和 GMGS09 站位揭示的最老地层为中更新世, 不到 0.29 Ma. GMGS05、GMGS07、GMGS08 和 GMGS16 站位天然气水合物储层时代分别属于中更新世约 0.44 Ma 以来(图 2). 与神狐海域相比, 南

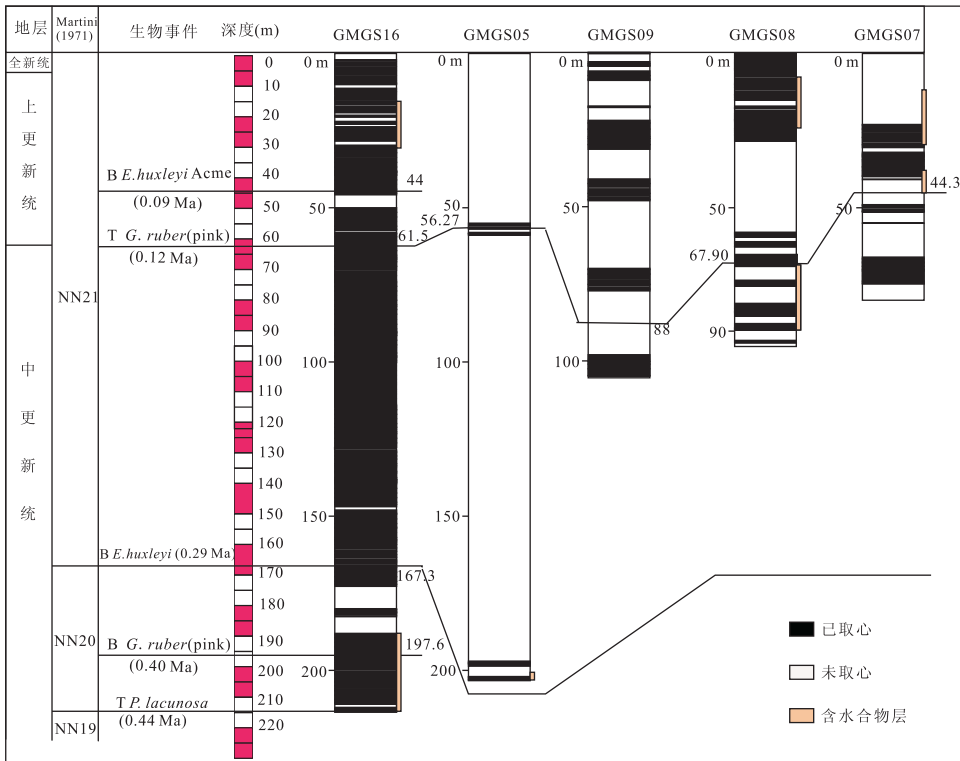


图 4 钻探区 5 个站位生物地层划分与对比

Fig. 4 Correlation of calcareous nannofossils and foraminifera zones and events among sites from the Dongsha gas hydrate-drilling area in SCS

海东北部东沙海域含天然气水合物层的沉积时代要新得多,神狐海域含天然气水合物层的沉积时代为晚中新世和晚中新世一早上新世(陈芳等,2013)。因此,南海东北部东沙海域的天然气水合物储层的时代范围比神狐海域的都要新,在中更新世以来(表 4),与水合物脊的相近。

3.2 沉积速率

根据各站位钙质超微化石、有孔虫生物事件出现的深度和年龄(表 3)计算出各时间段的沉积速率。结果表明:东沙海域天然气水合物钻探区各站位中更新世以来的沉积速率很高,GMGS05、GMGS07、GMGS08、GMGS09 和 GMGS16 站位的 0.12 Ma 以来的沉积速率分别为 46.9、36.9、56.6、73.3 和 51.3 cm/ka(表 3),平均沉积速率为 54.2 cm/ka;GMGS16 站位 0~44 m(0.09 Ma 以来)处的沉积速率为 48.9 cm/ka,44.0~61.5 m(0.09~0.12 Ma)处的沉积速率为 58.3 cm/ka,61.5~167.3 m(0.12~0.29 Ma)处的沉积速率为 62.3 cm/ka,167.3~197.6 m(0.29~0.40 Ma)处的沉积速率为 28 cm/ka,197.60~213.55 m(0.40~0.44 Ma)处的沉积速率为 39.9 cm/ka(图 5),0.44 Ma 以来的平均沉积速率为 47.4 cm/ka。钻

表 3 南海东北部天然气水合物钻探区各站位 0.12 Ma 以来的沉积速率(cm/ka)

Table 3 Variation in sedimentation rates since 0.12 Ma in gas hydrate-drilling area of the northeastern SCS

站位	0.12 Ma 以来		
	T. G. ruber (pink)(cm)	厚度(cm)	沉积速率(cm/ka)
GMGS05	5 627	5 627	46.9
GMGS07	4 430	4 430	36.9
GMGS08	6 790	6 790	56.6
GMGS09	8 800	8 800	73.3
GMGS16	6 150	6 150	51.3

探区 120 ka 以来沉积速率最高达 73.3 cm/ka,说明东沙海域天然气水合物钻探区位于一高速堆积体上,这是继南海东北部最高沉积速率堆积体后发现的又一高速堆积体,东沙群岛东南部水深>2 000 m 的下陆坡区发育着迄今为止所发现的南海最高沉积速率堆积体,12 ka 以来沉积速率最高达 97 cm/ka(邵磊等,2007),不同的是前者位于>2 000 m 的下陆坡区,而本研究发现的高速堆积体位于水深约在 800~1 130 m 的上陆坡区。

3.3 沉积速率对天然气水合物成藏的影响

沉积速率常用于考证沉积物的多寡和沉积环境的动荡或平静,是天然气水合物成藏的主要控制因

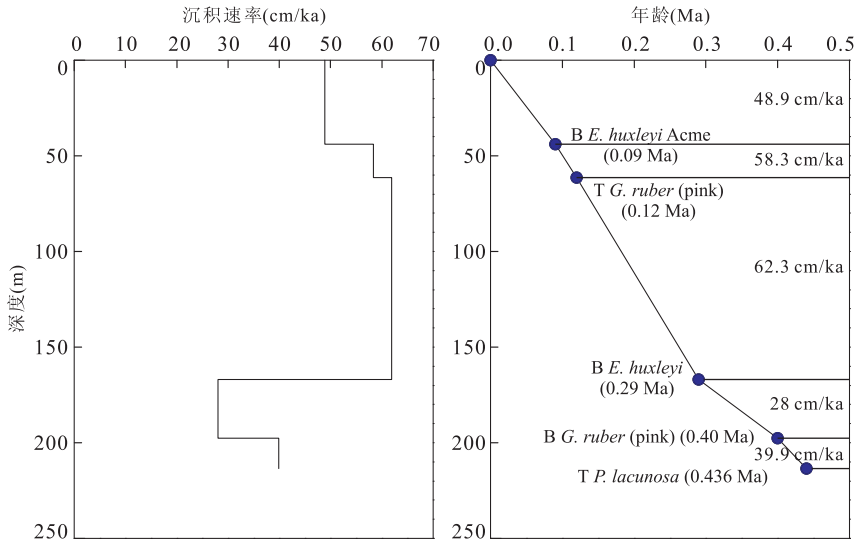


图 5 GMGS16 站点深度-年龄关系(据钙质超微化石、有孔虫生物事件)

Fig. 5 Sedimentation rates (left) and age-depth plot (right) for site GMGS16 based on calcareous nannofossils and foraminifera

素之一(Dillon *et al.*, 1998). 前人研究认为高沉积速率有利于天然气水合物的形成与赋存. 如从目前世界海域获取天然气水合物的岩心沉积物时代和沉积速率来看, 含天然气水合物地层的沉积速率一般较快, 通常超过 30 m/Ma, 如东太平洋海域中美海槽赋存天然气水合物的新生代沉积层的沉积速率高达 1 055 m/Ma; 西太平洋美国大陆边缘中的 4 个天然气水合物聚集区内, 有 3 个与快速沉积区有关, 其中布莱克海脊晚渐新世至全新世沉积物的沉积速率达 160 ~ 190 m/Ma (Mountain and Tucholke, 1985). 概括起来, 沉积速率与天然气水合物成藏的关系主要有 3 点: 首先, 大多数海洋天然气水合物为生物甲烷气, 在快速沉积的半深海沉积区聚集了大量的有机碎屑物, 由于迅速埋藏在海底未遭受氧化作用而保存下来, 并在沉积物中经细菌作用转变为大量的甲烷(Claypool and Kaplan, 1974), 为上覆的天然气水合物层提供微生物分解甲烷气源, 同样地, 南海天然气水合物甲烷属于微生物气或以微生物气为主的混合气成因气(黄霞等, 2010); 其次, 高沉积速率容易形成欠压区, 从而构成良好的输导体系(Dillon *et al.*, 1998); 此外, 还有的学者认为高沉积速率可以导致盆地热流值降低, 从而有利于天然气水合物的形成(Diaconescu *et al.*, 2001).

南海东北部东沙海域钻探区 0.12 Ma 以来的沉积速率介于 46.9 ~ 73.3 cm/ka 之间, 若按此沉积速率换算, 相当于 469 ~ 730 m/Ma, 说明钻探区的沉积速率是相当高的. 如此高的沉积速率表明物源丰富多样, 各站位除含有自生碳酸盐岩和生物碎屑

层位外, 其他层位粗组分(如有孔虫)和 CaCO_3 含量偏低, 一般不超过 1% 和 10%, 表明沉积物组分中陆源物质含量相当高, 钻探区高沉积速率主要是由于陆源物质大量输入造成的, 同时还有较多的砂砾级自生碳酸盐岩和双壳等生物碎屑沉积(陈芳等, 2015 未发表, 南海东北部陆坡天然气水合物多期次分解的沉积地球化学响应). 丰富陆源物质的输入使得有机碳含量增高, 钻探区有机碳含量介于 0.50% ~ 1.49% 之间, 平均值为 0.81% (据实测数据). 当沉积物中的有机碳平均值大于 0.50% 时就足以产生大量的生物成因甲烷(Paul and Mastsumoto, 2000). 有机碳含量高, 甲烷生成量相对增加(Martens and Klump, 1980), 因此, 南海东北部陆坡沉积物中的有机碳含量可以为天然气水合物的形成提供充足的气源. 此外, 高沉积速率加上沉积物偏粗(钻探区钻孔部分沉积物中含有丰富的砂砾级自生碳酸盐岩和生物碎屑), 更容易形成欠压区, 形成良好的输导体系. 钻探区所在盆地热流值较低, 为南海低热流区之一(金春爽等, 2004), 这可能与高沉积速率有关. 因此, 南海东北部东沙海域钻探区同时具备气源充足、输导体系良好和地热流值偏低的 3 大特点, 而这三者恰好是天然气水合物形成的有利条件. 这也是南海东北部东沙海域钻探区天然气水合物矿藏丰富、类型多样(层状、块状、结核状、脉状及分散状)(张光学等, 2014)的主要原因, 也是明显区别于南海神狐海域钻探区的主要特征. 尽管南海海域神狐钻探区沉积物中的有机碳含量与南海东北部东沙海域钻探区的相近, 平均值为 0.7% (据实测数据),

表 4 南海天然气水合物钻探区沉积速率的对比

Table 4 Comparison of sedimentation rates between Shenhu and Dongsha gas hydrate-drilling areas in SCS

航次	站位	岩心长(m)	沉积速率(cm/ka)				钻井底部年代(Ma)	钻达地层	天然气水合物层位	
			全新世	更新世	上新世	中新世				
南海天然气水合物钻探		SH1B	261.86	26.25	2.02	2.94	>5.85	<7.362	中新统	
	神狐海域(GMGS1) (陈芳等,2013)	★SH2B	238.85	—	1.96	3.27	>4.18	<7.362	中新统	中新统
		SH5C	175.17	34.16	5.16	—	—	~4.470	上新统	
		★SH7B	194.18	20.00	5.71	1.88	—	7.018	中新统	中新统—上新统
	东沙海域(GMGS2)	★GMGS05	203.30	—	46.90	—	—	<0.290	中更新统	中更新统以来
		★GMGS07	74.76	—	36.90	—	—	<0.290	中更新统	中更新统以来
		★GMGS08	93.84	—	56.60	—	—	<0.290	中更新统	中更新统以来
		GMGS09	104.95	—	73.30	—	—	<0.290	中更新统	中更新统以来
		★GMGS16	213.55	—	51.30	—	—	~0.440	中更新统	中更新统以来

注:★SH2B 等代表钻取天然气水合物的站位。

但由于沉积速率偏低(表 4),沉积物偏细(陈芳等, 2013),输导体系不如南海东北部东沙海域钻探区的,因此其天然气水合物类型相对单一,为分散型水合物。由此可见,高沉积速率有利于天然气水合物的形成与赋存,是天然气水合物成藏的重要因素之一,这与前人的研究结果相一致。

4 结论

南海东北部东沙海域天然气水合物钻探区 5 个站位海底以下约 214 m 的岩心沉积物共识别出中更新世以来 *B. E. huxleyi* Acme(0.09 Ma), *B. E. huxleyi*(0.29 Ma)和 *T. P. lacunosa*(0.44 Ma)3 个钙质超微化石事件以及 *T. G. ruber* (pink)(0.12 Ma)和 *B. G. ruber*(pink)(0.40 Ma)2 个有孔虫事件,确定了钻探区所钻达最老地层为中更新统约 0.44 Ma。

钻探区天然气水合物产出带的地层为中更新世—全新世约 0.44 Ma 以来,比神狐海域的要新的多。钻探区 0.12 Ma 以来的沉积速率介于 36.9~73.3 cm/ka,平均值高达 54.2 cm/ka,0.44 Ma 以来的平均沉积速率为 47.4 cm/ka,是南海在东沙陆坡区发现的第 2 个高速堆积体。表明东沙陆坡天然气水合物钻探区位于一高沉积速率堆积体上,高沉积速率使得钻探区内有机碳含量增高,输导体系良好和热流值降低,更有利于天然气水合物的成藏,该结论与前人研究结果一致。

致谢:南海北部第二次天然气水合物钻探航次(GMGS2)的科学家们完成钻孔岩心取样工作,在此表示衷心的感谢!

References

Anthonissen, D. E., Ogg, J. G., 2012. Cenozoic and Cretaceous Biochronology of Planktonic Foraminifera and Calcareous Nannofossils. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., eds., The Geologic Time Scale 2012. Elsevier Science Press, Amsterdam, 1083—1127.

Bolli, H. M., Saunders, J. B., Perch-Nielsen, K., 1985. Plankton Stratigraphy. Cambridge University Press, Cambridge.

Blow, W. H., 1979. The Cainozoic Globigerinida. Brill, E. J., (3 Volumes), 1—1413 Leiden.

Claypool, G. E., Kaplan, I. R., 1974. The Origin and Distribution of Methane in Marine Sediments. Natural Gases in Marine Sediments. Plenum Press, New York, 99—139.

Chen, F., Su, X., Zhou, Y., 2013. Late Miocene-Pleistocene Calcareous Nannofossil Biostratigraphy of Shenhu Gas Hydrate Drilling Area in the South China Sea and Variation in Sedimentation Rates. *Earth Science*, 38(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).

Dillon, W. P., Danforth, W. W., Hutchinson, D. R., et al., 1998. Evidence for Faulting Related to Dissociation of Gas Hydrate and Release of Methane off the Southeastern United States. *Geological Society London Special Publications*, 137(1): 293—302. doi:10.1144/gsl.sp.1998.01.23

Diaconescu, C. C., Kieckhefer, R. M., Knapp, J. H., 2001. Geophysical Evidence for Gas Hydrate in the Deep Water of the South Caspian Basin, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 18(2): 209—221.

Huang, X., Zhu, Y. H., Lu, Z. Q., et al., 2010. Study on Genetic Types of Hydrocarbon Gases from the Gas Hydrate Drilling Area, the Northern South China Sea. *Geoscience*, 24(3): 576—580 (in Chinese with English abstract).

Jing, C. S., Wang, J. Y., Wang, Y. X., et al., 2004. Geother-

- mal Field Characteristics in the Area of Gas Hydrates Distribution. *Chinese Journal of Geology*, 39(3): 416—423 (in Chinese with English abstract).
- Li, B. H., Jian, Z. M., Li, Q. Y., et al., 2005. Paleooceanography of the South China Sea since the Middle Miocene: Evidence from Planktonic Foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 54(2005): 49—62. doi: 10. 1016/j. marmicro. 2004. 09. 003
- Li, B. H., Chen, M. P., Zhao, Q. H., et al., 2001. Planktonic Foraminiferal Events and Their Paleooceanographic Significances in the Southern South China Sea since the Last 800, 000 Years. *Acta Micropaleontologia Sinica*, 18(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Y., Lourens, L., Wang, P. X., 2007. New Ages for Neocene Marine Biostratigraphic Events. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 197—208 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Yao, Y. J., Shen, B. Y., 2015. On Linkage of Western Boundary Fault Soft the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 615—632 (in Chinese with English abstract).
- Lourens, L. J., Hilgen, F. J., Shackleton, N. J., et al., 2004. The Neogene Period. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., Eds., *A Geological Time Scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge, 409—440.
- Martini, E., 1971. Standard Tertiary and Quaternary Calcareous Nannoplankton Zonation. In: Farinacci, A., ed., *Proc. 2nd Int. Conf., Planktonic Microfossils Roma: Rome (Ed. Tecnosci.)*, 2: 739—785.
- Martens, C. S., Klump, J. V., 1980. Biogeochemical Cycling in an Organic-Rich Coastal Marine Basin: Methane and Sediment-Water Exchange Processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(3): 471—490. doi: 10. 1016/0016-7037(80)90045-9
- Mountain, G. S., Tucholke, B. E., 1985. Mesozoic and Cenozoic geology of the U. S. Continental Slope and Rise. In: Poag, C. W., ed., *Geologic Evolution of the United States Atlantic Margin*. Van Nostrand-Reinhold, New York, 293—341.
- Okada, H., Bukry, D., 1980. Supplementary Modification and Introduction of Code Numbers to the Low-Latitude Cocolith Biostratigraphic Zonation (Bukry, 1973, 1975). *Mar. Micropaleontol.*, 5(3): 321—325. doi: 10. 1016/0377-8398(80)90016-X
- Paul, C. K., Matsumoto, R., 2000. Leg 164 Overview. In: Paul C. K., Matsumoto, R., Wallace, P. J., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (v. 164)*. Ocean Drilling Program, Texas, 3—10.
- Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., et al., 2006. A Review of Calcareous Nannofossil Astrobiochronology Encompassing the Past 25 Million Years. *Quaternary Science Reviews*, 25(23—24): 3113—3137. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2006. 07. 007.
- Shao, L., Li, X. J., Qiao, P. J., et al., 2007. Deep Water Bottom Current Deposition in the Northern South China Sea. *Scientia Sinica Terrae*, 7(6): 771—777 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. X., Yang, S. X., Zhang, M., et al., 2014. GMGS2 Expedition Investigates Rich and Complex Gas Hydrate Environment in the South China Sea. “Fire in the Ice”, the Methane Hydrate Newsletter of the U. S. Department of Energy. *Fire in the Ice*, 14(1): 1—5.
- Zhang, G. X., Liang, J. Q., Lu, J. A., et al., 2014. Characteristics of Natural Gas Hydrate Reservoirs on the Northeastern Slope of the South China Sea. *Natural Gas Industry*, 34(11): 1—10. doi: 10. 3787/j. issn. 1000-0976. 2014. 11. 001.

附中文参考文献

- 陈芳, 苏新, 周洋, 2013. 南海神狐海域天然气水合物钻探区钙质超微化石生物地层与沉积速率. *地球科学*, 38(1): 1—9.
- 黄霞, 祝有海, 卢振权, 等, 2010. 南海北部天然气水合物钻探区烃类气体成因类型研究. *现代地质*, 24(3): 577—580.
- 金春爽, 汪集旸, 王永新, 等, 2004. 天然气水合物地热场分布特征. *地质科学*, 39(3): 416—423.
- 李前裕, Lucas Lourens, 汪品先, 2007. 新近纪海相生物地层事件年龄新编. *地层学杂志*, 31(3): 197—208.
- 刘海龄, 姚永坚, 沈宝云, 2015. 南海西缘结合带的贯通性. *地球科学*, 40(4): 615—632.
- 邵磊, 李学杰, 乔培军, 等, 2007. 南海北部深水底流沉积作用. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(6): 771—777.
- 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等, 2014. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征. *天然气工业*, 34(11): 1—10.