

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.02145

冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究回顾与前景

陈芳, 周洋, 刘广虎

(广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要: 综述了与天然气水合物有关的冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究成果与应用。冷泉甲烷渗漏环境是区别于一般深海环境的特殊微环境, 随着天然气水合物勘探的深入和设备的更新, 越来越多的冷泉被发现, 冷泉底栖有孔虫的研究随之展开。生活在冷泉环境下的底栖有孔虫群落尤其适应高有机质、低氧、有甲烷释放的特定环境, 并能将水合物甲烷碳同位素值异常低的特性记录下来, 与无甲烷渗漏环境相比, 甲烷渗漏环境底栖有孔虫具有更负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 被作为水合物分解释放甲烷事件的记录和解释气候变化的证据之一。我国已在南海北部发现与水合物相关的冷泉并成功获取了天然气水合物实物, 开展天然气水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究有其必要性和重要性。

关键词: 底栖有孔虫; 碳同位素负偏移; 甲烷渗漏环境

中图分类号:P736.22

文献标识码:A

文章编号: 0256-1492(2011)02-0145-08

全球气候变化原因的确定是气候研究中最富挑战性的内容之一, 甲烷作为继 CO_2 之后第二大重要温室气体, 对全球气候变暖影响的潜力是 CO_2 潜力的 25 倍^[1], 其对全球气温变化的作用越来越受到人们的关注。海洋天然气水合物甲烷含量占 99% 以上, 其甲烷的释放已经影响了全球气候变化, 被视为全球气候变化的驱动因子之一。海洋微生物古生物在全球气候变化的研究中举足轻重, 而底栖有孔虫因其分布广而倍受关注, 除一般深海环境外, 其还能在甲烷冷渗漏、深海热液等特殊环境下生存。本文通过综述多年来国外对天然气水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究的成果, 了解甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究的最新动态, 追踪甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究成果的应用, 为我们的研究提供有益的借鉴。

1 天然气水合物与冷泉甲烷渗漏环境

天然气水合物是一种由水的冰晶格架及其间吸附的天然气分子(以甲烷为主)组成的固态化合物, 主要分布于海洋陆坡区和陆地永久冻土带。天然气水合物因其储量巨大、埋藏浅、能量密度高、分布广、规模大而被认为是 21 世纪最理想的新型替代能源, 其所蕴含的甲烷等烃类化石燃料及其分解释放的

大量甲烷气体(温室气体)对未来经济和全球气候变化将产生深刻影响, 成为目前国内外研究的热点之一。当温度、压力或外界环境发生变化破坏天然气水合物稳定边界条件时, 水合物分解成甲烷气和水, 富含甲烷气和溶解离子、温度较低的冷泉流体通过泥火山、底辟和断层等流体通道以喷溢或渗流形式从深部向上运移到海底浅部, 在喷溢或渗流口周围形成依赖于流体的细菌席、蛤床和管状蠕虫等化能自养生物群落和自生碳酸盐岩冷泉沉积。冷泉是寻找水合物的海底最有效的特征标志之一, 目前里海、鄂霍次克海、墨西哥湾、伊尔河盆地、卡斯凯迪亚和布莱克海台等多个海区均发现有冷泉。与正常深海环境不同, 冷泉甲烷渗漏环境是一特殊的微环境, 水合物分解产生的甲烷与海水、沉积物中离子和氧发生的甲烷缺氧氧化反应、耗氧甲烷氧化反应产生硫化物和二氧化碳, 使渗漏口附近的环境发生改变, 为高有机质、低氧、有甲烷释放、硫化氢含量高的微环境。调查研究表明, 冷泉甲烷渗漏环境不仅适合细菌席、双壳类和管状蠕虫等化能自养生物群落的生长, 同样适合底栖有孔虫, 底栖有孔虫仍能在含甲烷气环境中生存, 并能将水合物甲烷碳同位素值异常低的特性记录下来。

2 底栖有孔虫研究

1975 年, Roberts 和 Whelan 首次发现现代海洋环境下的冷泉甲烷渗漏点以来, 有关甲烷渗漏环境下的有机质生物群落的研究开始受到关注。最初

基金项目: 国家自然科学基金项目(40742007)

作者简介: 陈芳(1966—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事微生物学研究, E-mail: zhchenfang66@21cn.com

收稿日期: 2010-10-12; 改回日期: 2010-11-08。 文凤英编辑

对甲烷渗漏环境生物群落的研究以细菌微生物、管虫、双壳类等能够反映冷泉环境的宏观区系的化能自养生物群落为主,对有孔虫只是进行定性描述,研究对象限于胶结壳底栖有孔虫^[2]。随着海洋油气、天然气水合物勘探的深入、设备的更新及深潜器的广泛应用,越来越多的海底甲烷渗漏点在不同地质构造、不同水深、不同的基底被发现及取样,甲烷渗漏环境底栖有孔虫的研究才得以展开。先后有学者对北海^[3]、日本外海^[4]、墨西哥湾^[5-7]、加里福尼亚沿海^[8-12]、俄勒冈大陆边缘水合物脊^[13-15]、大西洋布莱克海台^[7,16]、爱尔兰海 Rockall 海槽^[17]、巴伦支海^[18]等海域活动水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫进行了详细的研究。

研究内容丰富,涉及活动冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫群落结构(丰度、分异度和优势种)、壳体稳定同位素、对甲烷渗漏特殊环境的响应机制及生理机制的研究等,通过底栖有孔虫群落结构和稳定同位素的研究评价甲烷对底栖有孔虫群落组合和地球化学的影响。研究手段多种多样,传统方法与现代方法相结合,有微体古生物学方法、生物群落结构分析方法、分子生物学方法、分类学、定量统计学方法和碳稳定同位素分析方法等。有学者专门研究甲烷渗漏环境活体底栖有孔虫,如 Sen Gupta 和 Aharon (1994)应用虎红染色(Rose-Bengal staining)首次将冷泉甲烷渗漏环境的底栖有孔虫活体单独分离出来,进行群落结构和同位素的研究;有学者对同一海区相邻的渗漏点和非渗漏点底栖有孔虫群落结构和同位素特征进行对比研究,如 Torres 等(2003)、Hill 等(2004)和 Heinz 等(2005)先后对水合物脊甲烷渗漏环境(伴生细菌席、蛤床)、非甲烷渗漏环境的活体与死体底栖有孔虫的组分、丰度、分异度和纵向分布特征进行研究;有学者对不同水深、不同基底、不同构造条件下甲烷渗漏区底栖有孔虫进行研究,如 Bernhard 等(2001)对具有相似水深(半深海)、氧含量和硫化物通量的南加利福尼亚蒙特里海湾和圣巴巴拉海盆的底栖有孔虫组合进行对比研究;Heiko Sahling(2003)对鄂霍次克海(太平洋西北部边缘海)不同水深处渗漏区底栖有孔虫组合进行统计并分析了其影响机制^[19]; Panieri(2005 年)对 Rockall 海槽区具有相同岩性的水深为 800~1 000 m 的渗漏区和非渗漏区有孔虫丰度和分异度进行分析,认为有孔虫组合的改变是其对甲烷渗漏环境的响应;有学者采用不同的生物学方法对有孔虫三磷酸腺苷浓度(ATP)、细胞的亚显微结构进行研究,对现代渗漏区完整的底栖有孔虫群落进行定

量分析,从食物供给方面研究底栖有孔虫存活的机理等。还有学者对古冷泉口化石底栖有孔虫进行研究,如 Barbieri(2004)、Martin(2006)分别对意大利中新世古冷泉口和卡斯凯迪亚(Cascadia)汇聚边缘增生楔上新世古冷泉口的化石底栖有孔虫组合和稳定同位素进行研究,发现古冷泉口的底栖有孔虫碳同位素特征与现代冷泉的保持一致^[20-21]。

3 底栖有孔虫群落结构

水合物冷泉甲烷渗漏环境区别于一般的深海环境,底栖有孔虫对这种缺氧的、高含量甲烷、硫化氢环境的响应如何?为了回答该问题,底栖有孔虫群落结构的研究自然成为水合物冷泉甲烷渗漏环境有孔虫研究的主要内容之一,包括底栖有孔虫(活体加死体)组分、丰度、分异度和优势种等。对多个活动水合物冷泉甲烷渗漏环境(表 1)研究结果表明,底栖有孔虫群落有以下几大特征:

(1)不同的水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫群落特征存在差异。如墨西哥湾水合物甲烷喷溢口的底栖有孔虫组合中以 *Bolivina ordinaria*、*Gavelinopsis translucens*、*Cassidulina neocarinata* 为优势种;而加里福尼亚北部伊尔河(Eel River)水合物甲烷渗漏口以 *Uvigerina*、*Bolivina*、*Chilostomella*、*Globobulimina* 和 *Nonionella* 为优势种;加里福尼亚圣巴巴拉海盆甲烷渗漏口以 *Bolivina tumida*、*Epistominella pacifica*、*Oridorsalis umbonatus*、*Uvigerina peregrina* 为优势种;水合物脊水合物甲烷渗漏口则以 *Uvigerina peregrina*、*Cibicidoides mckannai* 和 *Globobulimina auriculata* 为优势种(图 1);而大西洋布莱克海台水合物丘甲烷渗漏口底栖有孔虫组合中以 *Bolivina lowmani*、*Globocassidulina subglobosa* 占优势。

(2)底栖有孔虫的丰度和分异度在水合物冷泉渗漏环境并没有表现出一致性的特征。与非甲烷渗漏环境相比,一些甲烷渗漏环境底栖有孔虫丰度相对较低;一些甲烷渗漏环境底栖有孔虫丰度相对较高;一些甲烷渗漏环境底栖有孔虫丰度与非甲烷渗漏环境的相似。如布莱克海台水合物丘甲烷渗漏口底栖有孔虫丰度较非甲烷渗漏环境的高,有孔虫以玻璃质壳为主,瓷质壳和胶结壳很少^[16];北海甲烷渗漏环境底栖有孔虫丰度和分异度较非甲烷渗漏环境的低^[3];亚得里亚海一有水合物面貌特征的区域底栖有孔虫密度(个/克)和 Shannon-Wiener 分异度指标急剧减小^[22],而另一浅水甲烷渗漏环境(水深

表1 世界部分活动冷泉分布特征与底栖有孔虫研究相关信息

Table 1 Distribution of active cold methane seeps and benthic foraminifera in the world

冷泉分布	水深/m	基底/环境	样品类型	资料来源
北海	150~180	Beggiatoa 细菌席	深潜器取样,死体活体有孔虫	文献[3]
墨西哥湾	584~695	麻坑,水合物丘,细菌席,活体双壳类	深潜器取样,岩心顶部0~1 cm 样品,抓斗样,虎红染色,活体有孔虫	文献[5]、[6]、[7]
加里福尼亚北部伊尔河	500~525	沉积物含水合物,蛤床,自生碳酸盐岩、自生碳酸盐结核	深潜器取样,岩心顶部0~10 cm 样品,虎红染色,死体活体有孔虫。	文献[8]
加里福尼亚圣巴巴拉海盆	120	麻坑、细菌席、自生碳酸盐岩,断层发育,全新世地层缺失,沉积物富含海绿石。	ROV 取样,岩心顶部0~20 cm 样品,死体底栖浮游有孔虫	文献[10]
俄勒冈水合物脊	785~787	水合物、Beggiatoa 细菌席、 <i>Calyptogena pacifica</i> 蛤床、自生碳酸盐岩。	深潜器取样,岩心顶部0~20 cm 样品,死体活体有孔虫	文献[13]、[14]
大西洋爱尔兰海 Rockall 海槽	800~1 000	水合物	岩心顶部0~1 cm 样品,死体有孔虫。	文献[17]
巴伦支海	1 250	水合物、泥火山、麻坑、管状蠕虫、细菌席	ROV 取样,电视多管取样,岩心样	文献[18]
亚得里亚海	25	Beggiatoa 细菌席	0~1 cm 表层样,虎红染色,死体活体有孔虫。	文献[23]

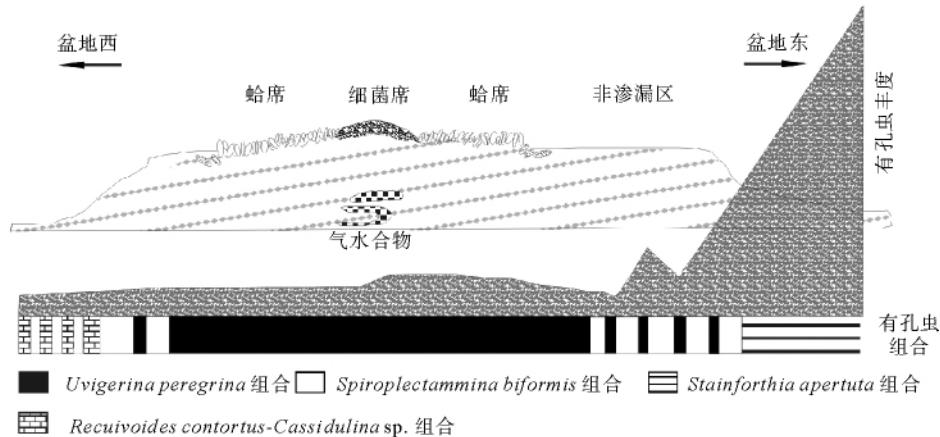


图1 水合物脊水合物冷泉甲烷渗漏环境与非甲烷渗漏环境底栖有孔虫组合示意图(据文献[14]修改)

Fig. 1 Benthic foraminiferal assemblages from different environments at the southern Hydrate Ridge (from Heinz P, et al, 2005)

25 m)底栖有孔虫密度则高于非渗漏环境^[20];蒙特里海湾渗漏环境底栖有孔虫丰度较非渗漏环境丰度低,但是在半深海平均值范围内,分异度相近^[8];爱尔兰西部 Porcupine Basin(650~1 000 m 水深)与甲烷渗出相关的碳酸盐隆起堆相对于碳酸盐基底附近海区底栖有孔虫分异度高而密度低。

(3)水合物冷泉甲烷渗漏环境没有地方种的存在。在甲烷渗漏环境发现的属种同样可以出现在非甲烷渗漏环境,但渗漏环境属种所表现出的一些特殊性的信息仍然值得我们关注,归纳总结可划分为以下两大类:

第1类:经常出现在甲烷渗漏环境的属种

该类属种在大多数水合物冷泉甲烷渗漏环境中均有出现,但同时也在非渗漏环境经常被发现,如 *Bulimina* (*B. striata*, *B. alazanensis*, *B. mexican*)、*Cassidulina* (*C. laevigata*, *C. carinata*, *C. norvangi*, *C. neocarinata*, *C. curvata*, *C. subglobosa*, *C. delicata*)、*Uvigerina peregrina* 等在日本外海、墨西哥湾、加里福尼亚沿海几个冷泉活动区均有报道。一些在蒙特里海湾冷泉和加利福尼亚北岸冷泉中均有出现的种类如 *Bolivina spissa*、*B. pacifica*、*Buliminell tenuata*、*Chilostomella oolina*、*Epis-*

tominella smithi、*Loxostomum pseudobeyrichi*、*Nonionella globosa* 等也常常出现在加利福尼亚边缘非渗漏环境。

第2类: 特别适应甲烷渗漏环境的属种

这些属种在甲烷渗漏环境中比在非渗漏环境中更经常出现, 这些属种被认为对甲烷渗漏环境有高的容忍度, 更容易适应这种环境。例如, *Rutherfordoides cornuta* 和 *Bulimina striata* 在甲烷渗漏环境丰度增高, 其中 *R. cornuta* 的出现与沉积物含有高浓度的甲烷有关, 而 *B. striata* 的分布受周围水体硫化氢含量的影响; *Cassidulina delicata*、*Epistominella pacifica*、*Fursenkoina rotundata*、*Spiroplectammina biformis* 丰度在甲烷渗漏环境高于非甲烷渗漏环境; *Uvigerina*、*Bolivina*、*Epistominella* 和 *Nonionella* 等能够适应高有机质、低氧、有甲烷释放的环境; *Bolivina tumida* 只在圣巴巴拉海盆有高浓度的甲烷渗流区高丰度出现; *B. lowmani* 和 *G. subglobosa* 明显受甲烷渗漏的影响, 其丰度在甲烷渗漏环境明显高于非甲烷渗漏环境。

4 底栖有孔虫碳同位素的研究与应用

天然气水合物在全球气候变化中的作用主要是依据有孔虫同位素的变化而提出的^[21], 最近十几年, 越来越多的浮游、底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中的极端负异常事件在第四纪和古新世等地质时期迅速变暖时被识别、发现。生活在水合物冷泉甲烷渗漏环境下的底栖有孔虫直接或间接地受其微生境环境和生态因素的影响, 有孔虫壳体能够记录其生长期和早期成岩作用时其周围水体(孔隙水和流体)的同位素值。因此, 本着“将今论古”的原则, 活动水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫碳同位素的研究成为当今研究的热点和重点。尽管研究结果还存在着矛盾和争议, 但大多数活动水合物冷泉甲烷渗漏环境底栖有孔虫碳同位素的研究结果表明, 底栖有孔虫能够记录水合物甲烷碳同位素值异常低的特性。因此, 对甲烷渗漏环境底栖有孔虫研究更重要的成果在于其稳定碳同位素的应用方面。大多数研究结果发现, 与无甲烷渗漏环境相比, 甲烷渗漏环境底栖有孔虫具有更负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。早在 1994 年 Sen Gupta 和 Aharon 在研究墨西哥湾底栖有孔虫的同位素特征时就发现: 甲烷渗漏环境底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显负偏移且在较大范围内变化($-1.3\text{\textperthousand} \sim -3.6\text{\textperthousand}$), 而非甲烷渗漏环境 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对偏正且在较小范围内变化($-0.4\text{\textperthousand} \sim -0.9\text{\textperthousand}$) (图 2), 以广

布种 *U. peregrina* 为例, 该种在甲烷渗漏点的碳同位素值为 $-1.92\text{\textperthousand} \sim -2.59\text{\textperthousand}$, 而在没有甲烷溢出环境其 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般为 $-0.1\text{\textperthousand} \sim -1.0\text{\textperthousand}$, 说明受高浓度甲烷碳同位素的影响, 记录的负 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映水合物分解释放甲烷的事件; Rathburn 等(2000)对加里福尼亚北部伊尔河活动甲烷渗漏点总底栖有孔虫(活体和死体)同位素组分研究发现, 同一渗漏点、同一岩心、同一个种的化石底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比活体底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要偏负 $3.6\text{\textperthousand} \sim 4.1\text{\textperthousand}$, 说明底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值能反映甲烷渗漏, 可作为地质时期水合物分解甲烷释放的指示, 并与全球气候变化联系起来; Hill 等(2004)研究发现太平洋东北部水合物脊现代甲烷渗漏点底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-1.28\text{\textperthousand} \sim -5.64\text{\textperthousand}$, 而非渗漏点的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-0.81\text{\textperthousand} \sim -0.85\text{\textperthousand}$, 且活体和化石的底栖有孔虫种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有差异, 说明自生碳酸盐岩沉积对底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响不大。在活动水合物冷泉甲烷渗漏环境中, 内生种和表生种所记录的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在差异, 表生种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要反映底层水溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 而内生种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要反映孔隙水溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

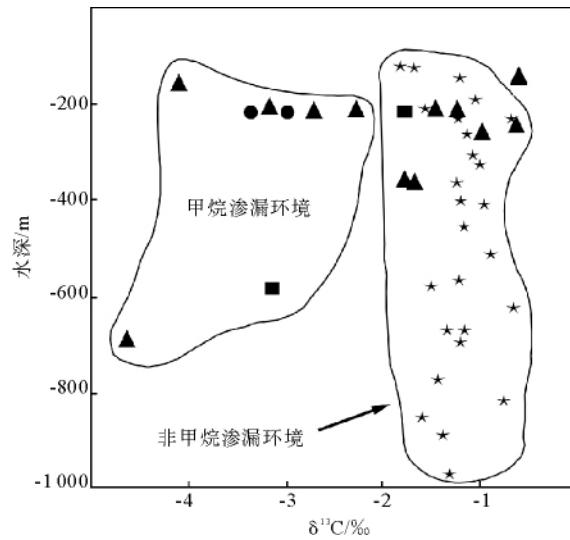


图 2 墨西哥湾甲烷渗漏环境与非甲烷渗漏环境底栖

有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比较(据文献[5]修改)

▲: *Uvigerina peregrina*; ●: *Bolivina subaenariensis*;

■: *Lenticulina* sp. ★: 数据自 Sen Gupta, 1994

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ of benthic foraminifera from different environments of the Gulf of Mexico (from Sen Gupta et al. 1994)

同样地, 底栖有孔虫碳同位素负偏移也被发现, 如圣巴巴拉海盆 ODP893A 孔在最近 5 万年的碳同位素记录中底栖、浮游有孔虫出现明显的多次负偏

移,最负值达 $-6\text{\textperthousand}$,推断是多次大量甲烷短时的释放事件所致(图3)。1994年,Wefer等对秘鲁ODP 680 B站位晚第四纪底栖有孔虫研究后,首次提出利用底栖有孔虫稳定同位素作为地质时期海洋沉积物中甲烷活动证据的可能性。随后,大量的研究发现,甲烷渗漏环境底栖有孔虫碳同位素负偏移,不仅可以作为甲烷渗漏活动的证据,而且在古渗漏环境的重建和气候变化的研究中也发挥着重要的作用。对此尽管存在争议,但水合物分解释放的甲烷已被

广泛用来解释地史时期的碳同位素偏移和气候的迅速变暖,如在秘鲁边缘^[25]、圣巴巴拉海盆^[26]、北大西洋^[27]、墨西哥湾^[28]、贝加尔湖^[29]的晚第四纪沉积记录中发现的底栖有孔虫碳同位素的负偏移,都被认为是水合物分解释放的甲烷证据,是触发气候迅速变暖的可能机制。此外,晚古新世^[30-31]、白垩纪^[32]和侏罗纪^[33-34]底栖有孔虫碳同位素值的负偏移也被应用作为海洋气体水合物甲烷释放和气候变化的证据和古渗漏区的重建。

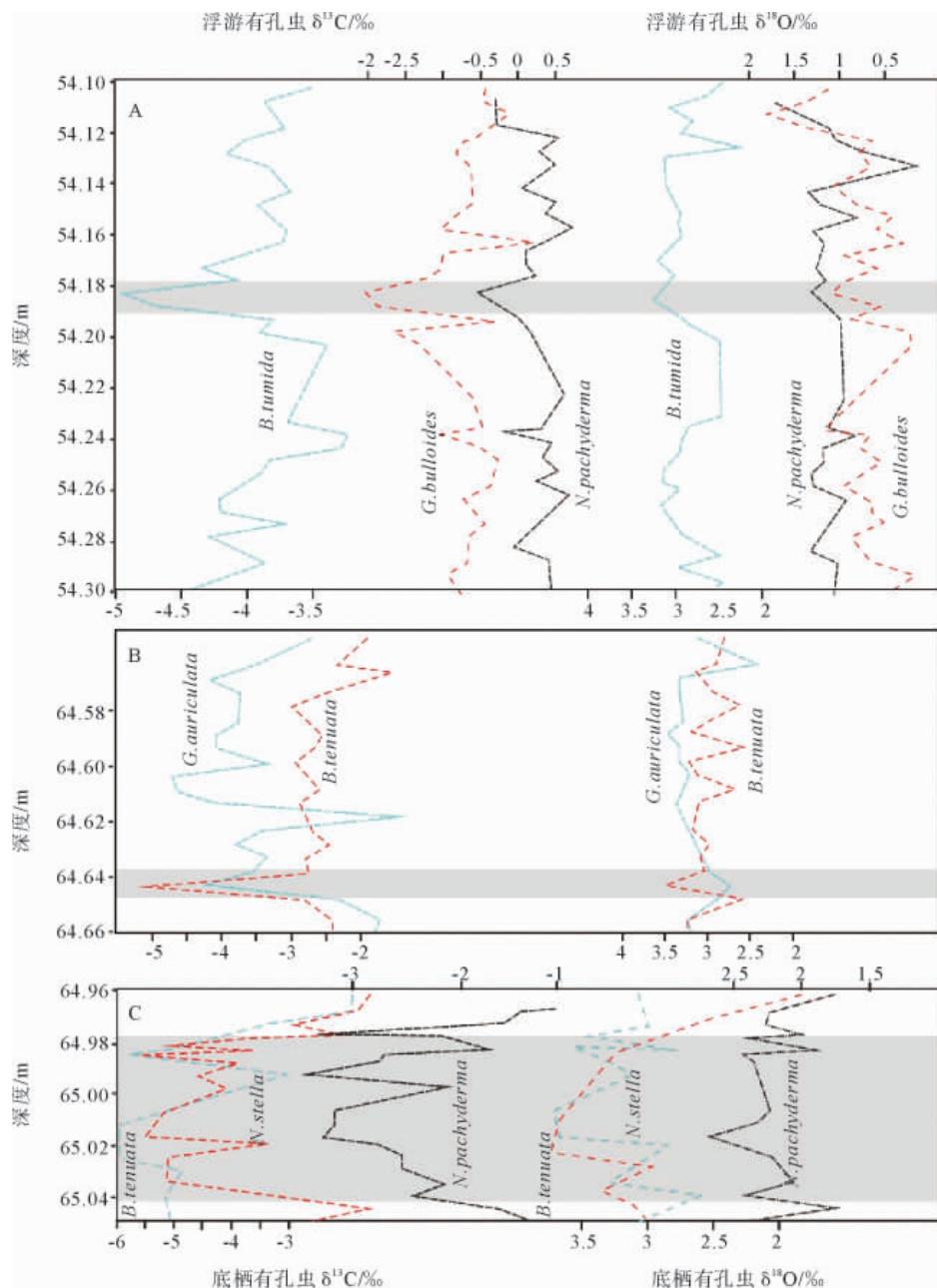


图3 ODP893孔近5万年高分辨率有孔虫碳同位素负偏移记录(据文献[12]修改)

A、B、C 阴影部分分别代表 37.1、43.9 和 44.1 ka

Fig. 3 Carbon isotopic excursion events of foraminifera in ODP Site 893, Santa Barbara Basin (from Hill T M, et al, 2004)

有孔虫碳同位素负偏移作为水合物分解释放甲烷事件和气候变化的证据,主要依据现代甲烷渗漏环境底栖有孔虫能够把受甲烷影响的底层水和孔隙水中溶解无机碳(DIC)的极负 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏移记录下来的特性;天然气水合物主要由甲烷组成,甲烷含量占99%以上,绝大多数是在缺氧沉积物内形成的典型的生物成因甲烷,碳同位素值异常低,一般为 $-40\text{\textperthousand} \sim -94\text{\textperthousand}$ PDB,大部分 $\leq -60\text{\textperthousand}$ PDB^[32]。在甲烷渗漏环境,甲烷与含氧丰富的沉积物或海水发生耗氧甲烷氧化反应,消耗氧产生 $\text{CO}_2 : \text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 。耗氧甲烷氧化会溶解碳酸盐矿物,因为 CO_2 是弱酸, CO_2 增大促进了碳酸盐矿物的溶解: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ 。由于水合物分解甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值极轻(通常 $< -60\text{\textperthousand}$ PDB),轻碳合并到溶解无机碳池和海洋生物骨骼中,影响溶解无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,使其偏移,进而影响底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 记录。尽管有孔虫壳体后期自生碳酸盐成岩作用以及初级生产力增加导致沉积物有机碳的增加等都可能造成底栖有孔虫碳同位素负偏移,但水合物分解释放甲烷仍然是底栖有孔虫碳同位素负偏移的潜在机制,被越来越多的学者所认可并与全球气候变化联系起来。

5 研究前景展望

我国开展天然气水合物调查研究近10年以来,尽管先后在南海北部发现与水合物相关的冷泉并成功获取了天然气水合物实物,但受调查设备所限,针对活动冷泉底栖有孔虫研究的原位取样很少。目前关于南海甲烷对底栖有孔虫影响的研究刚刚起步,并取得一些初步认识^[36-38]。由于受条件的限制,对冷泉尤其是活动冷泉底栖有孔虫的研究还没有真正展开,这方面的工作需要先进的调查设备和取样手段的支持。相信随着我国天然气水合物调查研究的推进与深入、调查设备的更新与应用,越来越多的冷泉将被发现,越来越多的与冷泉伴生的沉积物样品将被获取,为我们的研究提供更好的平台与更多的第一手材料。开展天然气水合物冷泉甲烷渗漏环境这一特定生态环境的底栖有孔虫的研究,不仅有利于与水合物有关的古渗漏环境的重建和更好地解释气候变化,而且可以作为寻找水合物的一个替代指标。

参考文献(References)

- [1] Kvenvolden K. Methane hydrate: A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. Chemical Geology, 1988, 71: 41251.
- [2] Kaminski M A. Cenozoic deep-water agglutinated foraminifera in the North Atlantic[R]. Unpublished Doctoral Dissertation, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution. 1988.
- [3] Jones R W. Preliminary observations on benthonic foraminifera associated with a biogenic gas seep in the North Sea[C]// Applied Micropaleontology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993: 69-91.
- [4] Akimoto K, Tanaka T, Hattori M, et al. Recent benthic foraminiferal assemblages from the cold seep communities-a contribution to the methane gas indicator[C]//Pacific Neogene Events in Time and Space. University of Tokyo Press, Tokyo, 1994: 11-25.
- [5] Sen Gupta B K, Aharon P. Benthic foraminifera of bathyal hydrocarbon vents of the Gulf of Mexico: initial report on communities and stable isotopes[J]. Geo-Marine Letters, 1994, 14: 88-96.
- [6] Sen Gupta B K, Platon E, Bernhard J M, et al. Foraminiferal colonization of hydrocarbon-seep bacterial mats and underlying sediment, Gulf of Mexico slope[J]. Journal of Foraminiferal Research, 1997, 27: 292-300.
- [7] Robinson C A, Bernhard J M, Levin L A, et al. Surficial hydrocarbon seeping fauna from the Blake Ridge(Atlantic Ocean, 2 150 m) and the Gulf of Mexico(690~2 240 m)[J]. Marine Ecology, 2004, 25(4): 313-336.
- [8] Bernhard J M, Buck K R, Barry J P. Monterey Bay cold-seep biota: assemblages, abundance, and ultrastructure of living foraminifera[J]. Deep-Sea Research I, 2001, 48: 2233-2249.
- [9] Rathburn A E, Levin L A, Held Z, et al. Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: ecology and stable isotopic composition[J]. Marine Micropaleontology, 2000, 38: 247-266.
- [10] Hill T M, Kennett J P, Spero H J. Foraminifera as indicators of methane-rich environments: a study of modern methane seeps in Santa Barbara Channel, California[J]. Marine Micropaleontology, 2003, 49: 123-138.
- [11] Rathburn A E, Perez M E, Martin J B, et al. Relationships between the distribution and stable isotopic composition of living benthic foraminifera and cold methane seep biogeochemistry in Monterey Bay, California[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2003, 4(12): 1106, doi:10.1029/2003GC000595.
- [12] Hill T M, Kennett J P, Spero H J. High-resolution records of methane hydrate dissociation: ODP site 893, Santa Barbara Basin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 223: 127-140.
- [13] Hill T M, Kennett J P, Valentine D L. Isotopic evidence for the incorporation of methane-derived carbon into foraminifera from modern methane seeps, Hydrate Ridge, Northeast Pacific[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(22): 4619-4627.

- [14] Heinz P, Sommer S, Pfannkuche O, et al. Living benthic foraminifera in sediments influenced by gas hydrates at the Cascadia convergent margin, NE Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 304: 77-89.
- [15] Torres M E, Mix A C, Kinports K, et al. Is methane venting at the seafloor recorded by $\delta^{13}\text{C}$ of benthic foraminifera shells? [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(3):13.
- [16] Parnieri G, Sen Gupta B K. Benthic foraminifera of the Blake Ridge hydrate mound, Western North Atlantic Ocean[J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 66: 91-102.
- [17] Panieri G. Benthic foraminifera associated with a hydrocarbon seep in the Rockall Trough (NE Atlantic) [J]. *Geobios*, 2005, 38: 247-255.
- [18] Mackensen A, Wollenburg J, Licari L. Low $\delta^{13}\text{C}$ in tests of live epibenthic and endobenthic foraminifera at a site of active methane seepage[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21, A2022, doi:10.1029/2005PA001196.
- [19] Heiko Sahling, Dirk Rickert, Raymond W Lee, et al. Macrofaunal community structure and sulfide flux at gas hydrate deposits from the Cascadia convergent margin, NE Pacific[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 231: 121-138.
- [20] Barbieri R, Panieri G. How are benthic foraminiferal fauna influenced by cold seep? Evidence from the Miocene of Italy [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204: 255-275.
- [21] Martin R A, Nesbitt E A, Campbell K A. Carbon stable isotopic composition of benthic foraminifera from Pliocene cold methane seeps, Cascadia accretionary margin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246: 260-277.
- [22] Panieri G. Benthic foraminifera response to methane release in an Adriatic Sea pockmark[J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia (Milano)*, 2003, 109(3): 549-562.
- [23] Panieri G. Foraminiferal response to an active methane seep environment[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 61: 116-130.
- [24] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D K, 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.
- [25] Wefer G, Heinz P M, Berger W H. Clues to ancient methane release[J]. *Nature*, 1994, 369: 282.
- [26] Kennett J P, Cannariato K G, Hendy I L, et al. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials[J]. *Science*, 2000, 288: 128-132.
- [27] Smith L M, Sachs J P, Jennings A E, et al. Light delta C-13 events during deglaciation of the East Greenland continental shelf attributed to methane release from gas hydrates[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(11): 2217-2220.
- [28] Keigwin L D. Late Pleistocene-Holocene paleoceanography and ventilation of the Gulf of California[J]. *J. Oceanogr.*, 2002, 58: 421-432.
- [29] Prokopenko A A, Williams D F. Deglacial methane emission signals in the carbon isotopic record of Lake Baikal[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 218(1-2): 135-147.
- [30] Dickens G R, Castillo M M, Walker J C G. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate[J]. *Geology*, 1997, 25(3): 259-262.
- [31] Katz M E, Pak D K, Dickens G R, et al. The source and fate of massive carbon input during the Latest Paleocene thermal maximum[J]. *Science*, 1999, 286: 1531-1533.
- [32] Jahren A H, Arens N C, Sarmiento J G, et al. Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the Early Cretaceous [J]. *Geology*, 2001, 29(2): 159-162.
- [33] Padden M, Weissert H, de Rafeis M. Evidence for Late Jurassic release of methane from gas hydrate[J]. *Geology*, 2001, 29(3): 223-226.
- [34] Palfy J, Demeny A, Haas J, et al. Carbon isotope anomaly and other geochemical changes at the Triassic-Jurassic boundary from a marine section in Hungary[J]. *Geology*, 2001, 29(11): 1047-1050.
- [35] Kvendvolden K. Gas hydrates-Geological perspective and global change[J]. *Rev. Geophys.*, 1993, 31: 173-187.
- [36] 陈芳,苏新,陆红锋,等.南海北部浅表层沉积底栖有孔虫碳同位素及其对富甲烷环境的指示[J].*海洋地质与第四纪地质*,2007,27(4):1-7.[CHEN Fang, SU Xin, ZHOU Yang, LU Hong Feng, et al. Carbon stable isotopic composition of benthic foraminifera from the north of South China Sea: indicator of methane rich environment[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, 27(4):1-7.]
- [37] 周洋,陈芳,苏新,等.南海东沙海域HD319岩心富甲烷环境底栖有孔虫群落结构[J].*海洋地质与第四纪地质*,2009,29(3):1-8.[ZHOU Yang, CHEN Fang, SU Xin, et al. Benthic foraminifera communities in methane-rich environment showed by core HD319 in Dongsha sea area of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(3):1-8.]
- [38] 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 Shennu area in the Northern South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(2):1-8.]

A REVIEW OF STUDIES ON BENTHIC FORAMINIFERA IN COLD METHANE SEEPS ENVIRONMENT

CHEN Fang, ZHOU Yang, LIU Guanghu

(Guangzhou Marine Geologic Survey, Guangzhou, 510760)

Abstract: This paper briefs the researches and progress of benthic foraminifera in the environment of cold methane seeps related to gas hydrate, with emphasis on its difference with the normal deep sea environment. More and more cold seeps have been found recently with the application of new technology, such as submersible and remotely operated vehicle. Benthic foraminifera could adapt themselves to the high organic and low oxygen gas hydrate related cold methane seep environment, and keep a very negative $\delta^{13}\text{C}$ value as a record. So far, carbon isotopic ($\delta^{13}\text{C}$) excursions in the geologic record have been used as an evidence of methane release from gas hydrate and global temperature change. Such a gas hydrate related cold methane seeps have been found in the South China Sea, and the gas hydrate samples have been successfully recovered from its northern continental slope. It is a necessity to study the benthic foraminifera in the cold methane seep environment for further exploration of gas hydrate in this region.

Key words: benthic foraminifera; carbon isotopic excursion; global climate change; cold methane seep environment; gas hydrate