

文章编号:1009-2722(2017)02-0007-12

海底冷泉标志与主要冷泉区的分布和比较

席世川^{1,2}, 张鑫^{1*}, 王冰^{1,2}, 栾振东¹, 陈长安¹, 阎军¹

(1 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

2 中国科学院大学, 北京 101400)

摘要:海底冷泉从发现到现在已经近 40 年, 主要发生在大陆边缘及边缘海盆地。海底冷泉的地球物理探测、地球化学研究、地质现象等提供了冷泉的寻找标志。在研究海底冷泉的过程中, 一般从地球物理探测、海洋原位探测、生物地球化学和生物标志化合物等角度去研究冷泉的形成过程及环境, 这些研究巩固并扩展了冷泉的寻找标志。对于沉积物中的元素, 采用主成分因子分析法判断物质来源和分布, 为分析冷泉的产物时提供了一个宏观背景。重点比较了我国近海的 7 个冷泉区域, 并从冷泉碳酸盐岩和生物群落两方面对全球 3 种代表性的地质背景下的冷泉区域做了比较。通过比较指出了冷泉研究存在的问题和未来的研究方向。

关键词:冷泉; 甲烷; 生物群落; 冷泉碳酸盐岩; 原位探测

中图分类号: P736.12

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.02002

冷泉是一种以水、碳氢化合物(天然气和石油)、硫化氢、细粒沉积物为主要成分, 温度较低, 与海水温度相近的流体, 主要分布在被动陆缘和主动陆缘斜坡海底沉积面之下^[1]。冷泉是继海底热液之后的又一重大发现, 二者都反映了海底的极端环境, 但同时在这种环境中又生活了大量的生物, 是目前地球科学的研究热点。1983 年, 在墨西哥湾佛罗里达陡崖 3 200 m 深发现海底冷泉

(海底天然气渗漏)特征及其相关产物。1984 年, 在俄勒冈州岸边俯冲区又发现了甲烷渗透流, 之后在太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋活动和被动大陆边缘 1 400~3 500 m 深处发现了数十个冷泉。在我国, 已经初步确认的近海冷泉区主要有 7 个, 东海仅发现冲绳海槽 1 个冷泉区, 南海海域分布 6 个, 包括台西南海域、东沙群岛西南海域、东沙群岛东北海域、神狐海域、南沙海槽和西沙海槽海区^[2]。2015 年 3 月, 首次在珠江口盆地发现的“海马冷泉”具有非常重要的意义, 之后的研究对它的分布范围、地形地貌、生物群落、自生碳酸盐岩及流体活动特征等有了更加准确的认识^[3]。随着勘探的不断深入, 全球冷泉越来越多地被发现(图 1), 目前研究程度最深的冷泉区域包括阿留申群岛、卡斯卡迪亚、巴巴多斯、俄勒冈州沿岸和墨西哥湾等地区^[4-25]。

收稿日期: 2016-10-26

基金项目: 中国科学院“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”战略性先导科技专项(XDA11040301, XDA11030301)

作者简介: 席世川(1992—), 男, 在读硕士, 主要从事海底热液/冷泉研究工作。E-mail: 15501265293@163.com

* 通讯作者: 张鑫(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要从事深海探测若干关键技术方法、热液/冷泉地球化学方面的研究工作。E-mail: xzhang@qdio.ac.cn

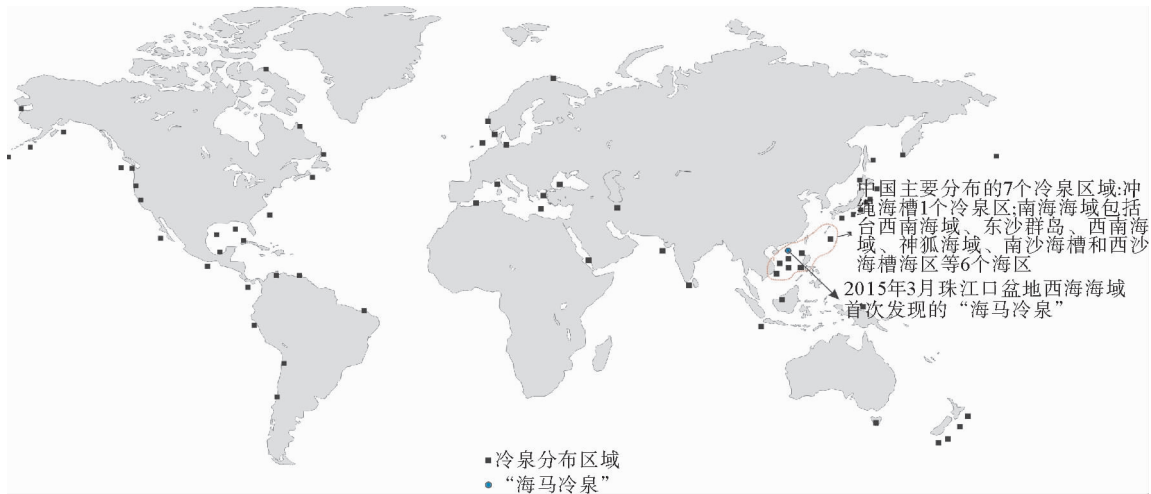


图1 全球冷泉分布

Fig. 1 The global distribution of cold seep

1 海底冷泉的探寻标志

海底冷泉作为一种渗漏现象,经常伴随着大量自生碳酸盐岩、生物群落、泥火山、麻坑、泥底辟等较为宏观的地质现象,也是海底的重点观测对象;另外,甲烷浓度异常, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度降低也是重要的特征。冷泉区大量生物群落的发现对于研究深海极端环境下的生物和生命过程有重要的价值,也是探索深部生物圈的一个重要窗口;冷泉碳酸盐岩是冷泉的重要标志,同时也是海底埋藏型天然气水合物形成的重要地质现象,因此,其一直被视为指示现代海底可能存在天然气水合物的重要标志。

导致冷泉形成的因素主要包括:①海底沉积物埋藏或者沉积物滑动、运移及重新沉积;②全球气候变冷或变暖引起海平面的升降,从而使海底压力和温度变化;③构造抬升或海平面下降使压力降低;④与地震有关的压力快速变化、火山喷发、地温梯度升降;⑤海底底层水变暖或温盐环流变化,冬季变冷和夏季升温引起的海底环境变化^[2]。因此,当上述因素出现时,天然气或者海底之下的天然气水合物分解释放的甲烷沿着泥火山、构造面或沉积物裂隙向上运移和排放,便会形

成甲烷冷泉。目前研究的冷泉多以天然气为主要成分,其气体的重要来源是海底沉积物之下天然气水合物的分解,二者的关系非常密切,很大程度上,海底冷泉指示其海底之下存在天然气水合物。

甲烷排溢系统、羽状流、水合物脊等也与天然气相关,在冷泉区也经常出现,但是它们与冷泉又有些不同。甲烷排溢系统也是海底渗漏现象,以强烈的甲烷气泡柱向海底喷溢。羽状流是在地壳动力作用下,天然气(主要为热成因气)从地壳内部往上运移,穿过海底沉积层泄漏进入海水,形成海底气泡羽流,有时候气泡携带者水合物喷溢出海底,会出现海底“火焰”现象^[26]。这两者与冷泉的区别在于它们不是以流体的形式释放而是以气泡柱的形式排溢或喷出,冷泉流体以沉积建造流体为主,它的驱动力是上覆快速堆积、成岩压实和胶结作用、构造挤压和变形作用、深部的后生作用和成岩作用、海底沉积物中的天然气水合物分解作用等,但同时这三者都可以作为天然气水合物赋存的标志之一。水合物脊可以归为冷泉渗漏区,在该区域广泛发育天然气水合物,主要见于俄勒冈岸外 Cascadia 大陆边缘。

经过近 40 年的研究与探测,与冷泉相关的地质现象、地球物理、地球化学、冷泉生物群的特征如表 1。

表 1 海底冷泉主要特征简表

Table 1 The main characteristics of seabed seeps

类别	特征
地质现象	冷泉碳酸盐岩:冷泉渗漏的产物,通常结壳状、结核状、烟囱状、角砾状、块状等,主要主要为镁方解石、白云石和文石,但常是以单一矿物为主; 泥底辟:深部气源向上运移的良好通道,使气体能在合适的温压下成矿,例如天然气水合物; 泥火山:泥底辟顶部直接挤出海底,流体沿底辟体向上运移形成的地质体,在冷泉区域较常见; 麻坑:流体排放形成的海底凹陷,往往与深部气体逸散有关; 生物礁:与浅层气或冷泉存在有关的似珊瑚的岩群 ^[2] ; 海底滑坡:一些是因为冷泉渗漏或天然气水合物分解造成陆坡失稳,进而滑坡,造成较大的空间; 深水珊瑚礁:石化冷泉口,经常与碳酸盐丘共存 ^[2] ; 水合物脊:冷泉渗漏区,在该区域广泛发育天然气水合物。
地球物理	BSR:判断天然气水合物的重要标志,但是可以作为冷泉的气源的一个参考; 空白带:数字地震数据反映的大幅度负相带; 声学噪音 指示气体存在的不规则地震反射结构; 地球物理测井:气测异常、电阻率增高、低自然电位、密度降低、声波时差降低、中子孔隙度增大、介电常差异、自然伽马曲线降低或者无明显变化、地层微电阻率扫描所反映的一些地质异常等都可以作为参考; 多波束回声探测深度和背散射数据:指示冷泉区动物群 ^[27] 。
地球化学	冷泉碳酸盐岩: $\delta^{13}\text{C}$ 一般在 $-6\text{‰}\sim-5\text{‰}$ 之间,而 $\delta^{18}\text{O}$ 范围是 $-2\text{‰}\sim 7\text{‰}$,但通常表现为正值; 孔隙水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的浓度异常低,孔隙水中 $\delta^{18}\text{O}$ 异常和沉积物 CH_4 异常,可以作为辅助判断; 自生黄铁矿、菱铁矿、石膏、重晶石等都是冷泉碳酸盐岩常见矿物;其中黄铁矿常以长管状和草莓状集合体出现,具有极低 $\delta^{13}\text{C}$ 值,重晶石呈多孔或烟囱状产出。
冷泉生物	初级生产者:甲烷氧化菌、硫酸盐还原菌和共生的甲烷氧化菌、硫酸盐还原菌; 一级消费者:主要包括菌席(橘黄色,生活在富氧水体沉积物界面附近)和深海双壳类(贻贝类和蛤类)及蠕虫(管状群蠕虫和冰蠕虫)多毛类动物以及海星、海胆、海虾等,其中管状蠕虫只出现在冷泉流速较低的环境; 二级消费者:鱼、螃蟹、扁形虫、冷水珊瑚等; 底栖有孔虫:其碳酸盐壳体碳同位素可作为指示冷泉甲烷通量变化的潜在指标 ^[28] 。

2 海底冷泉的研究方法

通过已知的冷泉寻找标志找到冷泉后,对海底冷泉主要从海底地质现象、海洋地球物理、海底原位探测技术、地球化学、冷泉生物系统方面等进行研究。

2.1 冷泉的海洋地球物理研究

目前,海底冷泉的地球物理探测手段主要有多波束测深、旁侧声纳、浅地层剖面仪、海底可视观测等。海底冷泉区域经常有麻坑、溢出口、海底凹陷等地形地貌特征,能够被多波束测深、旁侧声纳和浅地层剖面仪探测到。冷泉喷出时伴随大量甲烷气泡的喷出,能够形成明显异于周围的阻抗

异常,能够在高频声学图像(旁侧声纳和浅地层剖面仪)上形成羽状、双曲状柱体等特征信号,喷出的甲烷也能被地球化学手段探测到^[29]。地震海洋学主要以传统的反射地震为主,应用于海水内部反射研究。由于海水内部的阻抗差异,而冷泉喷涌或渗漏的甲烷气泡能够形成明显的阻抗异常,理论上能够在反射地震剖面上被捕捉到。海底冷泉喷出的气泡会明显地改变该区域海水的声速,随着反射地震学对介质声速研究的深入和技术的成熟,能够可靠地分析海水内声速变化,为冷泉的识别提供依据^[29]。冷泉作为一种流体形态,在浅层剖面中反射明显减弱或者声学空白。刘伯然^[30]通过对南海东北部作浅地层剖面,将浅剖面中的声学异常体解释为冷泉活动羽状流。假使声学空白带是因为散落的自生碳酸盐岩造成

的,同时也说明该研究区域极可能存在冷泉活动。

2.2 冷泉的海底原位探测

深海原位探测技术是深海探测中非常重要的技术,原位探测将海底作为天然实验室,能够保证所获得的海底沉积物、流体等数据的可靠性和真实性。冷泉随时间的变化而具有不同的性质,所采集到的样品从海底到实验室会发生明显变化,因此,原位探测显得更为重要。浮标、锚系、ROV、AUV 等是重要的海底原位探测装备,但是观察时间短,提供的信息和数据相对较少。一些具备长时序观测能力的海底观测站技术需要得到重视和发展,如今已经取得了很大成果^[31]。

国外一些学者对于海底冷泉的测量已取得很大进展。Greinert 等^[32]运用超声波回波强度获得了渗漏气泡通量。Leifer 等^[33]运用自行研制涡轮渗漏帐篷对水合物脊和墨西哥湾等典型冷泉渗漏区进行渗漏气体流量测定,该测试装备适宜用在渗漏流量大的情况下使用。Robert 等^[34]通过获得遥测红外成像光谱数据估算甲烷释放到海表面的量。Leifer^[35]用光学气泡测量系统(BMS)测量羽状流中气泡的上升速率和气泡的直径分布。Salmi 等^[36]使用声学剖面锚系(APM)测量了美国格雷士海峡附近的陆架上麻坑的甲烷气泡渗漏通量,对于冷泉具有重要的指示意义。

国内对于冷泉的原位探测则起步较晚。代表性的有张鑫^[37,38]运用拉曼技术研制了一套深海沉积物孔隙水拉曼光谱原位定量探测系统,利用该技术可以获得深海沉积物中甲烷的真实浓度以及硫化氢气体、pH 值和硫酸根等多种海洋化学参数。邸鹏飞等^[10]对海底冷泉天然气渗漏原位在线流量测量简称原位在线测量装置的方法进行了研究,并开展了实验室内装置测定的初步研究,计划采用体积排空法的原理测定海底冷泉天然气渗漏通量。赵广涛等^[39]研制了深海海底边界层原位监测系统(Benvir),该设备可对深海近海底界面进行长期、原位、综合的观测。梁康康等^[40]设计了一种深海机器人的专用热流探针,获得了高密度的海底热流值,有利于冷泉探测。龙建军等^[41]开展了从透射声波角度讨论用声波参数声波振幅来测量海底冷泉渗漏甲烷渗漏流量的初步研究。

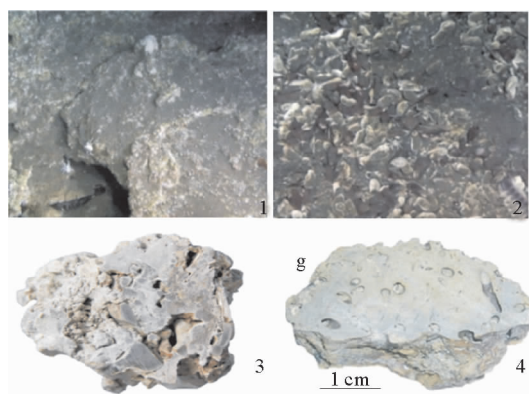
2.3 海底冷泉的地球化学

2.3.1 孔隙水的化学成分

海底天然气水合物形成过程中会导致孔隙水淡化,当富烃类流体(主要是甲烷)向海底运移过程中会使还原沉积物中的 SO_4^{2-} 浓度变低,除此之外 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 等也会出现异常,这些异常结合起来可以有效判断冷泉的活动。 SO_4^{2-} 、 I^- 等离子的垂直浓度梯度还可以用来估算甲烷缺氧氧化界面(SMI)的深度,从而估算甲烷渗漏通量^[42]。王淑红等^[43]通过孔隙水及碳酸盐中 $\delta^{44/42}\text{Ca}$ 来识别甲烷缺氧氧化界面的位置和探讨冷泉系统中钙同位素分馏的控制机制,这对天然气水合物的识别和形成机制的研究也具有重要参考作用。

2.3.2 冷泉碳酸盐岩以及伴生的自生矿物

冷泉碳酸盐岩是冷泉渗漏的产物,也是判断冷泉是否存在的重要标志(图2)。冷泉碳酸盐岩地球化学一直是研究重点,尤其在碳氧同位素方面,相对于海水和正常海相碳酸盐岩,冷泉碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 常是极低的负值,一般在 $-60\text{‰} \sim -5\text{‰}$,而 $\delta^{18}\text{O}$ 范围是 $-2\text{‰} \sim 7\text{‰}$,但常表现为正值^[11],这可能与渗漏区水合物分解产生的富集 ^{18}O 的孔隙水有关,其值大小主要与冷泉碳酸盐岩的流体来源和形成温度有关。Bayon G^[7]用 Sr/Ca 和 Mg/Ca 去推断冷泉背景下自生碳酸盐



1 较老的自生碳酸盐岩^[45]; 2 长满贻贝的冷泉碳酸盐岩^[45];
3 来自神狐海域^[45]的冷泉碳酸盐岩样品;
4 来自九龙礁^[46]的碳酸盐岩样品

图2 海底冷泉碳酸盐岩

Fig. 2 The authigenic carbonates on the seafloor

岩的存在,认为该背景下的碳酸盐岩的 Sr 和 Mg 比较富集,并且这种方法还可以有效应用到泥火山、泥底辟、麻坑、水合物脊等各种冷泉背景下沉积物孔隙水中高度溶解的地球化学元素的分类描述。Bayon 等^[13]提出 U—Th 法在冷泉碳酸盐岩的应用对于推断大陆边缘流体喷口的持续时间以及冷泉的生物地球化学过程有很重要的意义;卞友艳等^[44]通过对冷泉碳酸盐中的 Ce 异常进行研究来判断冷泉碳酸盐形成过程中的氧化还原环境。

当海底表层沉积物孔隙水中溶解一定数量的甲烷,环境具有较微弱的生物扰动作用、适度的流体流动速率和沉积速率,再经过甲烷缺氧氧化导致环境碱度的增加而形成冷泉碳酸盐岩^[47],但同时也伴生了一些非碳酸盐矿物。冷泉碳酸盐岩以微晶的碳酸盐矿物为主,最常见的有微晶方解石、微晶文石、微晶白云石、草莓状黄铁矿等。现代冷泉口上部和附近自生的菱铁矿分布普遍,自生菱铁矿的形成被认为与天然气水合物分解有关,即形成在硫化物分解缓慢而铁和 HCO_3^- 含量高的缺氧环境^[2]。黄铁矿的研究比较多,其继承了微生物活动形成的硫化氢的硫同位素特征,具有极负的 $\delta^{34}\text{S}$ 值而不同种类的硫酸盐还原细菌的硫同位素分馏能力的差异很大,所以 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围很大($-42\text{‰}\sim 2\text{‰}$)^[48]。黄铁矿中铁同位素分馏主要受 Fe 的异化还原(DIR)、硫酸盐的细菌还原(BSR)以及质量分馏等因素控制,其中 DIR 和 BSR 是有机质降解的主要途径^[48]。黄铁矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 可反映硫酸盐的还原速率和供给情况,而 $\delta^{54}\text{Fe}$ 可反映硫化物形成过程中微生物的参与情况,将二者结合起来有利于示踪黄铁矿的形成过程和探究铁同位素的分馏过程。高含量的黄铁矿通常可以作为识别沉积物甲烷异常的参数之一,也是判断冷泉的重要标志之一。

2.3.3 沉积物的元素分析

海底表层沉积物的组分、沉积速率等对于冷泉产物的形成具有很大的影响,尤其在分析冷泉碳酸盐岩时,需要结合海洋表层沉积物来对冷泉形成的过程和环境做出更合理的解释。在对沉积物的主量元素分析时可以采用主成分因子分析法^[49]。主成分因子分析是描述各个主量元素之间关系的有效方法,已经在地球化学数据分析中得到了广泛的运用。

以冷泉所在的重要区域——台西南为例。台西南海域表层沉积物主量元素分为 5 组:① SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 和 TiO_2 ; ② CaO 和 LOI; ③ MgO 和 Fe_2O_3 ; ④ MnO; ⑤ P_2O_5 。一般来讲, SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 主要存在硅酸盐或铝硅酸盐中,主要代表陆源碎屑来源和陆源物质输入特征;海洋沉积物中的 Fe_2O_3 和 MnO 主要以氧化物或氢氧化物形式存在,可能代表海洋中成分;而 P_2O_5 主要与生物作用密切相关,代表了海洋生产力的变化。CaO 和 MgO 常在碳酸盐岩矿物中存在,白云石和高镁方解石中 Mg 的含量较高,某种程度上二者也能反映钙质生物的分布情况。微量元素分析也是重要方面。以南海为例,Cu、Ni、Ba、Sc 元素明显分布在水深的深海盆地,沿离岸的方向增大,说明这些元素与细粒级的沉积物关系密切。Pb、Sr 主要在东沙群岛周围高,而东沙群岛周围以生物沉积作用为主,沉积颗粒较粗,说明这两者主要富集于颗粒较大的沉积物中,与生物碳酸盐碎屑沉积为主,属于亲生物源元素^[49]。

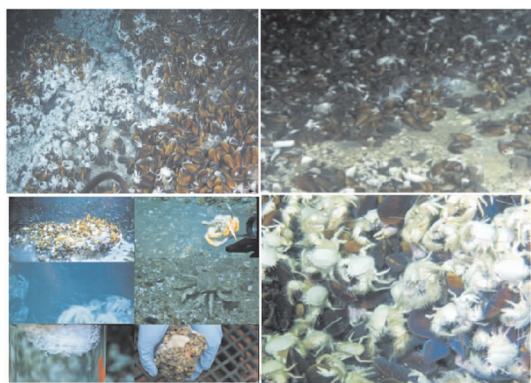
通过对海底表层沉积物的元素分析,可以很好掌握冷泉区域的宏观背景,尤其对于冷泉的重要标志——冷泉碳酸盐岩给出更合理的解释,有利于了解冷泉形成时所经历的环境。

2.4 冷泉生物系统及生物标志物

冷泉生物系统是海底冷泉形成的重要生物群落,也是指示海底冷泉非常直接的标志(图 3)。甲烷氧化菌和硫酸盐还原菌参与到冷泉流体中的甲烷与硫酸根离子的缺氧甲烷氧化反应中,为化能自养生物提供了碳源和能量^[50-52],成为冷泉生态系的初级生产者。在其基础上又发育着菌席和深海双壳类(贻贝类和蛤类)及蠕虫(管状群蠕虫和冰蠕虫)多毛类动物以及海星、海胆、海虾等一级消费者;其中管状蠕虫只出现在冷泉流速较低的环境,而鱼、螃蟹、扁形虫、冷水珊瑚等构成了二级消费者^[2]。

研究冷泉生物群落一定程度上能指示流体流动方向和大小等一些特性。菌席分布于硫化物与沉积物界面附近,形成的斑块^[53]可指示流体的位置和流体的规模,是流体强烈上涌的标志^[2]。张茜^[54]认为不同类型的冷泉双壳指示冷泉流体浓

度以及强弱,高速流体的冷泉只有嗜甲烷的双壳类生活,冷泉贻贝科主要分布在高流速、高浓度的甲烷气体。流速变化的冷泉和喷溢点集中的冷泉能提供蛤类适宜的环境^[2]。管状蠕虫只出现在冷泉流速较低的环境中,当冷泉流速降低,管状蠕虫替代原来的贻贝类成为主要物种。冷泉区的有孔虫丰度和分异度都相对于周边非冷泉区显得较低^[55],因此,冷泉区底栖有孔虫的研究更能反映底栖有孔虫群落对冷泉活动的响应。



1-2 繁茂的冷泉生物群落;
3 “发现”号 ROV 在台西南冷泉区观测到的生物群落
4 白色的潜铠虾和深色的贻贝
图 3 冷泉生物群落

Fig. 3 The biocenosis from the cold seep area

在冷泉区生态系统中微生物是生态系统的基础,甲烷氧化古菌和硫酸盐还原菌生物体在生命活动过程中会产生一系列特定的生物标志物,它们的种类、含量及其碳同位素比值不仅能够指示微生物的存在及种类,还可以用来分析古菌群落结构的变化,因而冷泉区微生物标志物已经成为冷泉区研究的一种重要地球化学手段,利用生物标志物及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值不仅能够证明 AOM 作用的存在和反应机制,还可以对冷泉区(尤其是古冷泉区)环境及微生物群落结构进行分析和重建^[56]。Niemann 等^[57]认为生物标志化合物及其强烈亏损的碳同位素特征可以用来示踪现代和古代冷泉环境中的 AOM 生物群落。Niemann 和 Elvert^[58]提出了 AOM 相关的生物标志化合物有 2 类:甲烷缺氧氧化古细菌相关生物标志化合物和硫酸盐还原细菌相关生物标志化合物。甲烷缺氧氧化古细菌相关生物标志化合物主要包括:①尾

尾相连接的无环 C_{20} 和 C_{25} 类异戊二烯,如 2,6,11,15-四甲基十六烷(C_{20} Crocetane)和 2,6,10,15,19-五甲基二十碳烷(C_{25} PMI);②醚类异戊二烯,如古细菌醇(archaeol 简称 Ar)和 sn_2 -/ sn_3 -/双羟基古细菌醇^[58],其中 Ar 普遍存在于与天然气水合物有关的冷泉体系厌氧沉积物、年轻的甲烷渗漏体系和富甲烷的泥火山中,并且具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。硫酸盐还原细菌相关生物标志化合物的典型代表有脂肪酸和烷基甘油醚,单烷基甘油醚主要指非类异戊二烯结构的烷基甘油醚(nonisoprenoidal monoalkyl glycerol ethers,简称 MAGEs)和非类异戊二烯结构的二烷基甘油醚(non-isoprenoidal dialkylglycerol ethers,简称 DAGEs)^[9]。葛璐等^[59]通过对神狐海域的研究,发现了 3 种 AOM 标志化合物:含双植烷链的甘油醚(archaeol)、非类异戊二烯结构的二烷基甘油醚(DAGE 1f)和单环二植基甘油二醚(单环 MDGD)。这些化合物具有强烈亏损的 $\delta^{13}\text{C}$ 值($\delta^{13}\text{C}$ 值在 15‰ ~ 104‰ 之间),明显低于一般海相沉积物中脂类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,充分表明其生物成因的甲烷来源。

3 我国近海的冷泉分布

我国近海广阔,但目前已发现的近海冷泉区只有 7 个。东海仅发现冲绳海槽 1 个冷泉区,南海海域分布 6 个,包括台西南海域、东沙群岛西南海域、东沙群岛东北海域、神狐海域、南沙海槽和西沙海槽海区。目前对于东沙群岛东北海域、神狐海域、台西南海域的研究程度很高,发现的冷泉区域也相对较多。结合前人的研究基础,我国近海 7 个海域的冷泉特征比较见表 2。

东海的冷泉研究程度相对较低,目前尚未发现冷泉沉积和冷泉生物,也没有关于冷泉碳酸盐岩的报道。李清等^[67]、王蒙等^[68]、王影等^[74]和栾锡武等^[75-77]学者分别从地球物理和地球化学的角度对冲绳海槽进行了研究,表明了其海底下的甲烷渗漏及甲烷缺氧氧化过程。南海的地质背景和构造有利于冷泉的发育,海底下可能存在大量天然气水合物或烃类气体,是重要的资源宝库。在东沙群岛西南海域虽然发现可能正在喷溢的冷泉,但是否发育冷泉生态系统仍未确定。其他海

表 2 我国海底冷泉区域特征

Table 2 The regional characteristics of seabed cold seep in China

分布海域	冷泉碳酸盐岩	生物特征	其他描述	区域代表性岩石和矿物	资料来源
神狐海域	灰色烟囱状、锥柱状或富含生物屑的块状,自生矿物主要为铁白云石、高镁方解石、文石少量菱铁矿, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-40.4\text{‰} \sim -38.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值 $3.8\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$	双壳类、珊瑚、管状蠕虫	浅层具备较厚的水合物稳定域,深部发育较厚的优质烃源岩;神狐海区同时存在甲烷缺氧氧化古细菌相关和硫酸盐还原细菌相关的两大类生物标志化合物,化合物具有强烈亏损的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和冷泉碳酸盐中极负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表明其碳源为甲烷的生物成因以及该区曾发生过强烈持续的富甲烷流体释放活动;冷泉具有多期多次活动特征	 	葛璐等 ^[59] 陆红锋等 ^[60] 佟宏鹏等 ^[61]
西沙海槽	碳酸盐结壳具有多孔结构,冷泉矿物为文石和重晶石,文石呈针状,重晶石呈矮柱状; $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-13.30\text{‰} \sim -29.59\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $2.32\text{‰} \sim 3.74\text{‰}$ 。	菌席、双壳类	冷泉碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表明其碳源主要为甲烷的热解成因,但也存在少量浅部生物成因;沉积物烃类气体(甲烷和乙烷)来源比南沙丰富;SMI 界面相对较浅		佟宏鹏等 ^[61] 孙春岩等 ^[62, 63]
南沙海槽	冷泉碳酸盐岩主要伴生矿物为草莓状的黄铁矿,多孔状石膏;	无资料	海底下数米内甲烷浓度增加上千倍;沉积物中的甲烷含量异常;陡的 SO_4^{2-} 梯度、SMI 较浅和甲烷含量快速增加		陈忠等 ^[64] 陈忠等 ^[65]
冲绳海槽	矿物主要是文石、白云石和高镁方解石。大多数样品只含单一碳酸盐矿物。主要发现自生黄铁矿,其硫同位素呈现正异常。 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-36.19\text{‰} \sim -53.74\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $0.63\text{‰} \sim 3.41\text{‰}$	无资料	发育泥火山、泥底辟,为地层中超高压气体及低密度流体向上迁移的有效通道,随着深度增加急剧亏损的硫酸盐浓度、强烈增加的甲烷浓度、显著增加的 TA 浓度和硫化氢浓度,以及孔隙水异常所指示的甲烷渗漏		栾锡武等 ^[66] 李清等 ^[67] 王蒙等 ^[68] 朱志敏等 ^[69] Sun 等 ^[70]
台西南海域	烟囱,结壳状,灰白色—灰黑色,主要由方解石、文石,黄铁矿,少量白云石, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-57.6\text{‰} \sim -35.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值 $2.4\text{‰} \sim 7.5\text{‰}$	菌席、贻贝类、蛤类、管状虫、多毛蟹和虾等	泥火山、泥底辟、麻坑较发育,已在 5 个站位发现冷泉碳酸盐岩,主要是高镁方解石,其碳源主要为甲烷的生物成因,并且流体富含 ^{18}O ,沉积物中烃类气体以甲烷为主,个别出现少量乙烷		陈忠等 ^[2] 佟宏鹏等 ^[61]

续表

分布海域	冷泉碳酸盐岩	生物特征	其他描述	区域代表性岩石和矿物	资料来源
东沙群岛东北海域	半固结的不规则结壳状、多孔状、烟囱状, 主要以高镁方解石、文石为主, 少量铁白云石、白云石、菱铁矿; $\delta^{13}\text{C}$ 均值 $-61.4\text{‰} \sim -33\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值 $1.4\text{‰} \sim 5.3\text{‰}$	菌席、管状蠕虫、双壳类腹足、珊瑚	已在 19 个站位采集到冷泉碳酸盐岩样品分布在九龙甲烷礁及其附近海域、深水区和一些零散分布的站位; 发育巨大面积的冷泉碳酸盐岩, 泥底辟发育; 含有碳酸盐岩中含丰富的 AOM 生物标志化合物和强烈的 ^{13}C 亏损; 碳酸盐岩发育区曾发生过强烈、持续的 CH_4 流体活动, 碳酸盐岩的碳源主要为甲烷的生物成因		于晓果等 ^[11] 陆红锋等 ^[60] 佟宏鹏等 ^[61] Han 等 ^[71]
东沙群岛西南海域	角砾状、球状、椭球状、烟囱状、胶结块。含铁白云石、菱铁矿, 少量文石、方解石等, $\delta^{13}\text{C}$ 均值 $-36.1\text{‰} \sim -18.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值 $0.4\text{‰} \sim 3.6\text{‰}$	冷水珊瑚、管状蠕虫	冷泉碳酸盐岩大致在水深 470~650 m 海底表层, 附生底栖有孔虫 <i>D. semiungulata</i> 在东沙西南区域大量出现, 并且其活体底栖有孔虫的碳同位素与相同水深控制站位相比明显负偏, 指示该地区可能存在冷泉活动; 冷泉碳酸盐岩进一步研究表明其碳源为甲烷的生物成因的可能性大, 但也有部分是热解成因的, 该海域存在至少 3 次较大的冷泉流体活动, 形成了不同期次的碳酸盐沉积; ΣREE 值高于其他海域		Wang 等 ^[72] 向荣等 ^[55] Tryon 等 佟宏鹏等 ^[61] 陈忠等 ^[73]

域虽然发现了一些天然气水合物样品, 但是没有拍摄或者采集到冷泉生物。佟宏鹏等^[61]对南海北部的冷泉碳酸盐岩进行了研究, 认为西沙海槽海域和东沙西南海域冷泉碳酸盐岩的碳可能主要来源于热解成因气, 并存在少量正常海水的溶解碳; 神狐海域的可能与混合成因有关; 东沙东北海域和台西南海域冷泉碳酸盐岩很轻的碳同位素组成, 说明碳酸盐岩的碳主要来源于生物成因气。总体上, 南海北部冷泉碳酸盐岩沉淀流体碳源呈现西南部渗漏以热解成因气为主, 东北部以生物成因气为主。

4 全球冷泉区域分布

随着海洋调查技术的不断提高, 对海底冷泉的研究范围逐渐从浅水区扩展到半深水和深水区, 已经在深海扩张中心、汇聚板块边界、被动主动大陆边缘、弧前盆地、断层、泥火山发育的海域发现海底冷泉分布。从热带海域到两极地区、从浅海陆架到深海海沟都有分布, 其中现代(活动)冷泉分布在除南北极地区外的各大洋, 多数分布

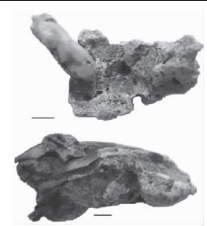
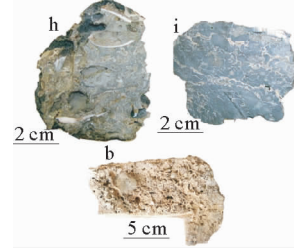
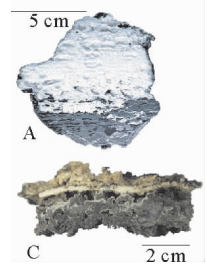
在太平洋的活动俯冲带。迄今发现的冷泉区域主要有西哥湾布什海山、水合物脊、哥斯达黎加增生楔、布莱克海台、圣塔芭芭拉海峡、红海^[78]、北极陆架、黑海、新西兰 Hikurangi 边缘、中国南海等。不同的海域具有不同的冷泉地貌和冷泉生态系统。在被动大陆边缘、活动大陆边缘、边缘海盆地 3 种主要的地质背景下, 典型的冷泉区域主要有墨西哥湾布什海山、水合物脊、中国南海, 它们的特征对比见表 3。

5 存在问题及未来展望

目前, 冷泉的研究还存在一些问题: ①冷泉的形成机制还有待完善, 一直侧重天然气、冷泉碳酸盐岩的地化研究和周围生态系统等, 伴随天然气喷出或溢出的流体很少有研究; ②冷泉系统中的白云石(岩)形成机理; ③甲烷缺氧氧化过程中对甲烷消耗量还不清楚; ④研究方法有局限性, 对冷泉系统中地球化学元素例如 Ca、Ce 等的研究仅在一定范围内有效, 解释相应的成因还需要其他方法来辅助; ⑤现阶段用冷泉碳酸盐岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 的

表 3 典型地质背景下冷泉区域的特征

Table 3 The regional characteristics of cold seep from typical geological background

分布区域	地质背景	沉积产物	其他特征	区域代表性岩石和矿物	资料来源
墨西哥湾布什海山	被动大陆边缘	冷泉碳酸盐岩呈固结或半固结的结壳,几乎全部由文石组成,仅含少量的方解石和白云石;草莓状黄铁矿	生物碎屑主要由双壳类、管状蠕虫和有孔虫组成,生物碎屑保存较好,表明其为原地生长;Ce 负异常或正异常,无异常表明其形成为氧化或还原环境;碳酸盐岩碳的来源主要是非甲烷的碳氢化合物		邸鹏飞等 ^[79]
中国南海	边缘海盆地	冷泉碳酸盐岩普遍发育烟囱状、结壳状,还会出现球状、多孔状;以文石、方解石为主,主要伴生矿物有黄铁矿、菱铁矿	冷泉生物有菌席、贻贝类、蛤类、双壳类,冷水珊瑚等;碳酸盐岩碳的来源主要是甲烷的生物成因;部分地区是热解成因或者混合成因		于晓果 ^[11] 陆红锋 ^[60] 佟宏鹏等 ^[61] Han 等 ^[71]
水合物脊 (俄勒冈岸外 Cascadia 大陆边缘)	活动大陆边缘	半固结自生碳酸盐岩主要为结壳状、硬底、烟囱、胶结物、天然气水合物	蚌、蛤、管状蠕虫、菌席;碳酸盐岩碳源主要来自热解成因或者混合成因,也有一部分来自生物成因;氮浓度异常高, $\delta^{15}N$ 值 3.30‰~5.68‰		陈多福等 ^[1] 邸鹏飞等 ^[11] Yu 等 ^[80] Bohrmann 等 ^[81]

负值和 $\delta^{18}O$ 的正值来判断形成冷泉碳酸盐岩的甲烷的来源并不是绝对的,关于甲烷的来源还需更深入的研究;⑥冷泉周围生物的生活习性、多样性、独特性以及冷泉的影响还有很大的疑点。

随着调查技术的提升,冷泉会不断被发现,关于冷泉的研究也会越来越深入。冷泉研究的未来发展方向包括:①海陆结合,将今论古。将陆上和海洋中发现的古碳酸盐岩结合起来研究,既能反映过去冷泉的地质过程也对今天冷泉的演化研究有很深的启发;②海底探测设备、原位观察仪器、实验室模拟条件等相关仪器的研发对于冷泉系统有更加精确的认识;③可以将海底冷泉生物的研究应用到生物医药学的研究当中;④保护冷泉系统,避免海底之下的甲烷气体进到大气中造成严重的温室效应。

海底冷泉的各种标志作为打开冷泉的钥匙,值得深入探讨。地质现象、地球物理、地球化学、生物群落等特征为寻找冷泉提供了重要线索。海底原位探测技术、实验室地球化学研究和生物标

志化合物的研究可以保证冷泉数据的可靠性从而对冷泉的形成过程做出合理解释。全球冷泉分布广泛,冷泉在一些局部地区表现出很大的不同,对于各个冷泉区域进行细致比较有助于冷泉工作的深入开展。冷泉与人类生活、全球气候、环境变化的关系研究需要努力。

参考文献:

[1] 陈多福,陈先沛,陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征[J]. 沉积学报,2002,20(1):34-40.
 [2] 陈 忠,杨华平,黄奇瑜. 海底甲烷冷泉特征与冷泉生态系统的群落结构[J]. 热带海洋学报,2007,26(6):73-82.
 [3] 陶 军,陈宗恒. “海马”号无人遥控潜水器的研制与应用[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程,2016,8(2):185-191.
 [4] Aloisi G, Wallmann K, Haese R R, et al. Chemical, biological and hydrological controls on the $14C$ content of cold seep carbonate crusts: numerical modeling and implications for convection at cold seeps[J]. Chemical Geology, 2004, 213(4):359-383.
 [5] Torres M E, Wallmann K, Tréhu A M, et al. Gas hydrate growth, methane transport, and chloride enrichment at the

- southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia margin off Oregon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226:225-241.
- [6] Klaucke I, Sahling H, Weinrebe W, et al. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea[J]. *Marine Geology*, 2006,231(1-4):51-67.
- [7] Bayon G, Pierre C, Etoubleau J, et al. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments; Implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments[J]. *Marine Geology*, 2007,241(1-4):93-109.
- [8] Duperron S, Sibuet M, MacGregor B J, et al. Diversity, relative abundance and metabolic potential of bacterial endosymbionts in three *Bathymodiolus* mussel species from cold seeps in the Gulf of Mexico[J]. *Environmental microbiology*, 2007,9(6):1423-1438.
- [9] Han X, Suess E, Huang Y, et al. Jiulong methane reef: Microbial mediation of seep carbonates in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2008,249(3-4):243-256.
- [10] Niemann H E M. Diagnostic lipid biomarker and stable carbon isotope signatures of microbial communities mediating the anaerobic oxidation of methane with sulphate[J]. *Org Geochem*,2008,39:1668-1677.
- [11] 邸鹏飞,冯东,高立宝. 海底冷泉流体渗漏的原位观测技术及冷泉活动特征[J]. *地球物理学进展*, 2008,23(5):1592-1602.
- [12] 于晓果,韩喜球,李宏亮. 南海东沙东北部甲烷缺氧氧化作用的生物标志化合物及其碳同位素组成[J]. *海洋学报*. 2008,30(3):77-84.
- [13] Bayon G, Henderson G M, Bohn M. U-Th stratigraphy of a cold seep carbonate crust[J]. *Chemical Geology*, 2009,260(1-2):47-56.
- [14] Yang T, Jiang S, Ge L, et al. Geochemical characteristics of pore water in shallow sediments from Shenhu area of South China Sea and their significance for gas hydrate occurrence[J]. *Chinese Science Bulletin*,2009,55(8):752-760.
- [15] Carlier A, Ritt B, Rodrigues C F, et al. Heterogeneous energetic pathways and carbon sources on deep eastern Mediterranean cold seep communities[J]. *Marine Biology*, 2010,157(11):2545-2565.
- [16] Kiel S. On the potential generality of depth-related ecologic structure in cold-seep communities; Evidence from Cenozoic and Mesozoic examples[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*,2010,295(1-2):245-257.
- [17] Law C S, Nodder S D, Mountjoy J J, et al. Geological, hydrodynamic and biogeochemical variability of a New Zealand deep-water methane cold seep during an integrated three-year time-series study[J]. *Marine Geology*, 2010,272(1-4):189-208.
- [18] Klaucke I, Weinrebe W, Linke P, et al. Sidescan sonar imagery of widespread fossil and active cold seeps along the central Chilean continental margin[J]. *Geo-Marine Letters*, 2012,32(5-6):489-499.
- [19] Li C, Liu X, Gou L, et al. Numerical simulation of bubble plumes in overlying water of gas hydrate in the cold seepage active region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012,56(4):579-587.
- [20] Brown G Jr, Sleeper K, Johnson M W, et al. Mercury concentrations, speciation, and isotopic composition in sediment from a cold seep in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013,77(1-2):308-314.
- [21] Krabbenhoeft A, Bialas J, Klaucke I, et al. Patterns of subsurface fluid-flow at cold seeps; The Hikurangi Margin, offshore New Zealand[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013,39(1):59-73.
- [22] Dumke I, Klaucke I, Berndt C, et al. Sidescan backscatter variations of cold seeps on the Hikurangi Margin (New Zealand): indications for different stages in seep development[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34(2-3):169-184.
- [23] Lemaitre N, Bayon G, Ondréas H, et al. Trace element behaviour at cold seeps and the potential export of dissolved iron to the ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014,404:376-388.
- [24] Rubin-Blum M, Shemesh E, Goodman-Tchernov B, et al. Cold seep biogenic carbonate crust in the Levantine basin is inhabited by burrowing *Phascolosoma* aff. *turnerae*, a sipunculan worm hosting a distinctive microbiota[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*,2014,90:17-26.
- [25] 卞友艳,陈多福. 海底冷泉环境中的白云石(岩)研究现状[J]. *矿物岩石地球化学通报*,2014,33(2):238-246.
- [26] 樊栓狮,关进安,梁德青. 天然气水合物动态成藏理论[J]. *天然气科学*, 2007,18(6):819-826.
- [27] Arunima Sen, Hélène Ondréas. The use of multibeam backscatter and bathymetry as a means of identifying faunal assemblages in a deep-sea cold seep[J]. *Deep-Sea Research I*, 2016(110):33-49.
- [28] 向荣,刘芳,陈忠,等. 冷泉区底栖有孔虫研究进展[J]. *地球科学进展*. 2010,25(2):193-202.
- [29] 宋海斌,刘伯然. 利用地震海洋学方法探测海底冷泉[J]. *中国地球物理学会第二十八年会议论文集*,2012,26:730.
- [30] 刘伯然,宋海斌,关永贤. 南海东北部陆坡冷泉系统的浅地层剖面特征与分析[J]. *地球物理学报*, 2015,58(1):247-256.
- [31] 徐翠玲. 南海冷泉区甲烷渗漏过程的原位观测研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013:1-70.
- [32] Greinert J, Nützel B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of methane bubble

- fluxes at cold seeps[J]. *Geo-Marine Letters*, 2004, 24(2):75-85.
- [33] Leifer I B J. Turbine tent measurements of marine hydrocarbon seeps on subhourly timescales[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C1):1978-2012.
- [34] Roberts H A P. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: a review of submersible investigations [J]. *Geo-Marine Letters*, 1994(14):135-149.
- [35] Leifer I. Characteristics and scaling of bubble plumes from marine hydrocarbon seepage in the Coal Oil Point seep field [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C11):1978-2012.
- [36] Salmi M S JHP, Leifer I, et al. Behavior of methane seep bubbles over a pockmark on the Cascadia continental margin[J]. *Geosphere*, 2011, 7(6):1273-1283.
- [37] 张鑫. 深海环境及深海沉积物拉曼光谱原位定量探测技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009:86-88.
- [38] 张鑫. 海洋环境观测技术的一些最新研究进展和思考 [C]//第一届海底观测科学大会会议及摘要集, 2012:46.
- [39] 赵广涛, 于新生, 李欣, 等. 一个深海海底边界层原位监测技术[C]//第一届海底观测科学大会会议及摘要集, 2012:60-61.
- [40] 梁康康, 童怀, 徐明亚. 深海机器人专用热流探针设计 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(9):62-65.
- [41] 龙建军, 黄为, 邹大鹏. 海底天然气渗漏流量声学测量方法及初步实验研究[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5):100-105.
- [42] 杨涛, 蒋少涌, 葛璐. 南海北部陆坡西沙海槽 XS-01 站位沉积物孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3):442-448.
- [43] 王淑红, 颜文, 陈忠. 海底冷泉系统中的钙同位素示踪研究进展[J]. *现代地质*, 2010, 24(3):589-597.
- [44] 卞友艳, 林治家, 冯东. 冷泉碳酸盐岩的稀土元素地球化学特征及氧化还原条件示踪[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5):37-44.
- [45] Feng D, Chen D F. Authigenic carbonates from an active cold seep of the northern South China Sea: New insights into fluid sources and past seepage activity[J]. *Deep-Sea Research II*, 2015, 2(3):1-11.
- [46] Han X Q, Suess E, Huang Y Y, et al. Jiulong methane reef: Microbial mediation of seep carbonates in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2008, 249: 243-256.
- [47] 冯东, 陈多福, 苏正. 海底天然气渗漏系统微生物作用及冷泉碳酸盐岩的特征[J]. *现代地质*, 2005, 19(1):26-32.
- [48] 陆红峰, 孙晓明, 张美. 南海天然气水合物沉积物矿物学和地球化学[M]. 科学出版社, 2011:178-179.
- [49] 陆红峰, 孙晓明, 张美. 南海天然气水合物沉积物矿物学和地球化学[M]. 科学出版社, 2011:35-47.
- [50] Hoehler T M, Alperin M J, Albert D B, et al. Martens, Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediment: evidence for a methanogen-sulfate reducer consortium[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, 8:451-454.
- [51] Michaelis W S R, Nauhaus K. Microbial reefs in the Black Sea fueled by anaerobic oxidation of methane[J]. *Science*, 2002, 297:1013-1016.
- [52] Gibson R N, Atkinson R J A, Gordon J D M, et al. Ecology of cold seep sediments: interactions of fauna with flow, chemistry and microbes[J]. *Oceanography & Marine Biology Annual Review*, 2005, 43:1-46.
- [53] Tryon M D, Brown K M. Complex flow patterns through Hydrate Ridge and their impact on seep biota[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(14):2863-2866.
- [54] 张茜. 南海北部陆坡地区晚更新世深海冷泉双壳类动物群落及其生态环境的讨论[D]. 中国地质大学(北京), 2007.
- [55] 向荣, 方力, 陈忠. 东沙西南海域表层底栖有孔虫碳同位素对冷泉活动的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(4):17-25.
- [56] 丁玲, 赵美训. 生物标志物及其碳同位素在冷泉区生物地球化研究中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2):133-142.
- [57] Niemann H, Duarte J, Hensen C, et al. Microbial methane turnover at mud volcanoes of the Gulf of Cadiz[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(21):5336-5355.
- [58] Niemann H, Elvert M. Diagnostic lipid biomarker and stable carbon isotope signatures of microbial communities mediating the anaerobic oxidation of methane with sulphate[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(12):1668-1677.
- [59] 葛璐, 蒋少涌, 杨涛. 南海北部神狐海域冷泉碳酸盐烟囱的甘油醚类生物标志化合物及其碳同位素组成[J]. *中国科学*, 2011, 56(14):1124-1131.
- [60] 陆红峰, 陈芳, 刘坚. 南海北部神狐海区的自生碳酸盐岩烟囱—海底富烃流体活动的记录[J]. *地质论评*, 2006, 52(3):352-357.
- [61] 佟宏鹏, 冯东, 陈多福. 南海北部冷泉碳酸盐岩的矿物、岩石及地球化学研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5):45-56.
- [62] 孙春岩, 王宏语, 牛滨华, 等. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化学勘探[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, 29(2):135-140.
- [63] 孙春岩, 牛滨华, 王宏语. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化勘探及成藏模式研究[J]. *地球科学*, 2005, 12(1):243-251.
- [64] 陈忠, 颜文, 黄奇瑜. 南沙海槽潜在天然气水合物的地质环境及其指标特征[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6):299-308.

- [65] 陈忠, 颜文, 陈木宏. 南沙海槽表层沉积自生石膏-黄铁矿组合的成因及其对天然气渗漏的指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 91-100.
- [66] 栾锡武, 秦蕴珊. 冲绳海槽古段西部槽底海底气泉的发现[J]. 科学通报, 2005, 50(8): 802-810.
- [67] 李清, 蔡峰, 梁杰, 等. 东海冲绳海槽西部陆坡甲烷渗漏发育的孔隙水地球化学证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2015(5).
- [68] Wang M, Cai F, Li Q, et al. Characteristics of authigenic pyrite and its sulfur isotopes influenced by methane seep at Core A, Site 79 of the middle Okinawa Trough[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(12): 2145-2153.
- [69] 朱志敏, 杨克红. 冲绳海槽北部冷泉碳酸盐岩对海底天然气渗漏活动的指示[J]. 矿物学报, 2015(s1).
- [70] Sun Z L, Wei H L, Zhang X H, et al. A unique Fe-rich carbonate chimney associated with cold seeps in the Northern Okinawa Trough, East China Sea[J]. Deep-Sea Research I, 2015, 95: 37-53.
- [71] Han X, Yang K, Huang Y. Origin and nature of cold seep in northeastern Dongsha area, South China Sea: Evidence from chimney-like seep carbonates[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3689-3697.
- [72] Wang S, Yan W, Chen Z, et al. Rare earth elements in cold seep carbonates from the southwestern Dongsha area, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 482-493.
- [73] 陈忠, 杨华平, 黄奇瑜. 南海东沙西南海域冷泉碳酸盐岩特征及其意义[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 382-389.
- [74] 王影, 龚定康. 东海冲绳海槽天然气水合物地震资料处理方法研究[J]. 海洋石油, 2007, 27(1): 14-18.
- [75] 栾锡武, 赵孙. 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): 92-101.
- [76] 栾锡武, 赵克斌, Obzhirv A, 等. 鄂霍次克海浅表层天然气水合物的勘查识别和基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2008(1): 99-107.
- [77] 栾锡武, 岳保静, AOzibhrv. 浅表层天然气水合物区的海底地形特征-以鄂霍次克海为例[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 420-429.
- [78] Batang Z B, Papathanassiou E, Al-Suwailem A, et al. First discovery of a cold seep on the continental margin of the central Red Sea[M]// Europe and the Recognition of New States in Yugoslavia. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 247-253.
- [79] 邸鹏飞, 冯东, 陈多福. 墨西哥湾布什山冷泉碳酸盐岩沉积岩石学及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 48-57.
- [80] Yu X G, Li J, GONG J M. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of gas hydrate-bearing sediment from Hydrate Ridge, Cascadia Margin[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2006, 49(8): 872-880.
- [81] Bohrmann G, Greinert J, Suess E, et al. Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability[J]. Geology, 1998, 26(7): 647-650.

THE INDICATORS OF SEABED COLD SEEP AND COMPARISON AMONG MAIN DISTRIBUTION AREAS

XI Shichuan^{1,2}, ZHANG Xin^{1*}, WANG Bing^{1,2}, LUAN Zhendong¹,
CHEN Changan¹, YAN Jun¹

(1 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: It is almost 40 years since the first seabed cold seep was discovered. Cold seeps mainly occur on the edge of continental margins and marginal-sea basins. The geophysical, geochemical and geological characteristics of submarine cold seeps are of great significance to the understanding of cold seeps. Geophysical and biogeochemical indicators, biomarker compounds and in-situ monitoring are important to the study of the forming mechanism and environments of cold seeps. As far as the elements of sediments are concerned, major component may contribute to the discrimination of source materials and provide a background for study of cold seeps. A total of 7 cold seep areas from China and 3 areas abroad are selected for comparison of authigenic carbonates and their biocenosis. Discussion is made on future tasks in cold seep studies.

Key words: cold seep; methane; biocenosis; authigenic carbonates; in-situ monitoring