

海洋极端环境微生物活动与油气资源关系

王家生, 王永标, 李清

中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 为了弄清海洋极端环境下微生物参与油气资源形成和演化的潜在机制, 进行了现代海洋热泉和冷泉等环境中微生物类型分析和生物量估算, 探讨了极端微生物活动和油气资源的潜在关系, 认为海洋极端环境下微生物类型主要为细菌和古细菌, 热泉微生物群落主要为异养发酵菌、硫酸盐还原菌、产甲烷菌等; 冷泉微生物群落主要为 ANME-2 族的厌氧甲烷氧化古细菌、硫酸盐还原细菌和 ANME-1 族厌氧甲烷氧化古细菌。这些极端微生物利用 CH_4 和 H_2S 等气体进行能量固定, 有较高的生物丰度和较低的分异度, 具有垂向和水平分带性, 并能营造一套独特的宏体生物。极端微生物活动直接和间接地参与了油气资源的形成和改造, 示踪海底油气资源的变迁, 对于探索地球早期海洋微生物活动与油气资源形成, 寻找地史时期或华南地史早期烃源岩具有重要理论和实践指导意义。

关键词: 海洋极端环境; 极端微生物; 油气资源; 潜在关系。

中图分类号: P744.4

文章编号: 1000-2383(2007)06-0781-08

收稿日期: 2007-08-26

Potential Relationship between Extremophiles and Hydrocarbon Resources in Marine Extreme Environment

WANG Jia-sheng, WANG Yong-biao, LI Qing

Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract To understand the potential mechanism of marine extremophiles participating in the formation and the evolution of hydrocarbon resources in marine extreme environments, some typical kinds of extremophiles and their distributions in marine hydrothermal venting and cold venting are discussed and evaluated respectively. The potential relationship between extremophile activities and hydrocarbon resources in marine extreme environments are then discussed in details. It could be now preliminary concluded that archaea and bacteria are the two main kinds of extremophiles in marine extreme environments. The dominating microbial communities in hydrothermal venting are heterotrophic zymogens, sulphate reducers and methanogens, while the ANME-2 group (*Methanosarcinales*) surrounded by sulfate-reducing bacteria and ANME-1 group are dominated in cold venting. Marine extremophiles would be able to use CH_4 and H_2S to synthesize energy for metabolism and to support food chains for other unique macrobiota nearby, which together present a high abundance but a low diversity with distinct characteristics of horizontal and vertical distributions. Marine extremophiles might play an important role either directly or indirectly in the processes of hydrocarbon formation and later alteration, and could indicate the evolution of hydrocarbon resources in marine extreme environments. Our research thus has a great significance both in theoretical approach of potential hydrocarbon resources formed by marine extremophile activities and in practical exploration of the potential hydrocarbon source sedimentary layers formed in the earth history or the potential strata in South China.

Key words: marine extreme environment; extremophiles; hydrocarbon resources; potential relationship.

基金项目: 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目 (No. G0800-06-ZS-319); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40472063, 40772073).

作者简介: 王家生(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事海洋地质和造山带综合地质研究. E-mail: js_wang@cug.edu.cn

极端环境(extreme environment)泛指存在某些特殊物理和化学状态的自然环境,包括高温、低温、强酸、强碱、高盐、高压、高辐射和极端缺氧环境等,适合在极端环境中生活的微生物称为极端微生物(extremophiles)(Margesin and Schinner, 2001; Rothschild and Mancinelli, 2001; 陈骏等, 2006; 张敏和东秀珠, 2006)。海洋极端环境一般是指与正常海洋环境绝然不同的物理化学环境,主要包括海底热泉、海底冷泉和泥火山环境,其次还包括高盐度(卤水)、强酸化、缺氧和滞流等海洋环境。海洋极端微生物通常为化能自养生物(chemoautotroph),在分类体系上属于细菌和古细菌类,生活在无光、无氧或少氧环境,能利用一些海底热催化反应过程中产生的还原性小分子(H_2 、 H_2S 和 CH_4 等)合成能量进行有机碳固定和新陈代谢,具有独特的基因类型、特殊生态群落、特殊生理机理和特殊代谢产物,有些属于内共生生物(endosymbiont)。此外,海洋极端微生物还为其环境内的宏体生物提供食物源,共同构成独特的海底极端环境食物链结构和生物群落。迄今,深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)已发现了大量的海底热泉和冷泉喷口化能自养生物,甚至在一些非冷、热泉位置也报道存在化能自养微生物群落(Paull *et al.*, 2005)。因此,海洋极端环境微生物已被列为 21 世纪综合大洋钻探计划(IO-DP)重点研究对象之一(IPSC, 2001)。

油气资源的形成和演化与时间、温度和有机质组成密切相关(Seewald, 2003),油气的产生、运移、圈闭和后期改造过程也大多是在一些特殊环境中进行的,极端微生物活动可能参与了整个过程。早在上世纪 30 年代就有油藏中微生物活动的报道(Krejci-Graf, 1932),海底热液异常区早已发现了油气异常(Simoneit and Lonsdale, 1982),油藏环境中相继报道存在大量极端微生物活动(刘金峰和牟伯中, 2004; 王万春和陶明信, 2005),极端微生物活动甚至直接参与了海洋天然气水合物的形成,在距今 34.8 亿年的海底玄武岩火山玻璃中也发现当初成岩不久后的微生物蚀变证据(Furnes *et al.*, 2004)。与此同时,在一些太古代地层中发现了可能与地球早期极端环境下微生物活动有关的原生油气包裹体和沥青质组分(Rasmussen and Buick, 2000; Dutkiewicz *et al.*, 2003, 2006; Rasmussen, 2005)。所有这些现象均暗示着,极端环境微生物活动可能与一些油气资源的形成和演化之间存在某种密切关系。事实上,

在现代一些海底热泉、冷泉和泥火山区已经发现了丰度极高的微生物群落(Parkes *et al.*, 2000; Boettius and Suess, 2004; 党宏月等, 2006),一些海底沉积物表面异常活跃的冷泉微生物席通常与下伏的天然水合物稳定带和深埋油气藏在空间上构成垂向分布规律。因此,探索海洋极端环境下微生物活动,不仅在理论上可将其作为特定地质微生物标志(geomicrobiological signature),揭示现代和地史时期海洋环境变化和地质环境变迁(党宏月等, 2006)、探索生物圈与地圈之间协同演化、阐明生物多样性形成机制和认识生命极限等(汪品先, 2003; 中国大洋钻探学术委员会, 2003),而且在实践中指导海洋深水油气田的开发和地史早期潜在烃源岩的寻找。

1 现代海洋极端环境中微生物活动

1.1 热泉微生物活动及数量估算

1.1.1 热泉微生物活动和分布特征 1977 年首次发现了海底热泉及其周围热泉生物(Baross and Hoffman, 1985),迄今在全球海底已发现了 200 多个类似的海底热泉系统。热泉流体喷出的速度可达 $0.7 \sim 5 \text{ m/s}$,并含大量酸性气体、还原性元素和离子(H_2S 、 H_2 、 CH_4 、 NH_3 、 CO_2 等气体, Fe、Cu、Zn、Pb、Au、Ag、Ca 等元素)。它们与低温海水混合产生了一系列矿物沉淀,形成高达 $10 \sim 50 \text{ m}$ 的黑烟囱(You and Bickle, 1998)、周围 $0 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度梯度带和化学梯度带,并营生了一套独特的热泉微生物群落(冯军等, 2005)以及极端嗜热化能自养微生物系统(Takai *et al.*, 2004)。热泉微生物种类大多为严格厌氧的种属,主要为异养发酵菌、硫酸盐还原菌、产甲烷菌等。它们大多呈微生物席产出,或者寄居在无脊椎动物体内,或者呈悬浮颗粒随热泉流体喷出(Deming and Baross, 1993)。与此同时,这些微生物作为初级生产者,提供食物给一些宏体生物管状蠕虫(*Vestimentifera*)、贻贝、蛤、虾类等(初级消费费);后者又作为二级生产者最终成为一些食肉动物(鱼)和食腐动物(蟹类)(三级生产者)的食物源,共同构成了热泉系统独特的生物群落和食物链结构。据统计,迄今在热泉区已发现了 10 个门、500 多个新属种生物类型(冯军等, 2005)。

热泉生物群落的分布具有水平和垂直分异现象。在水平方向上,在热泉中心喷口温度高达 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上范围内生活着一些耐高温的古细菌;水温在

40~110 °C 周边区域分布着多种古细菌和嗜热细菌, 它们贴附在沉积物或玄武岩表面形成层状微生物席; 在 20~40 °C 区域生活着大量多毛目蠕虫动物; 在 2~15 °C 区域生物种类繁多, 管状蠕虫、双壳类蛤、贻贝、腹足类、蟹类、虾类、鱼等多种动物生活其中(冯军等, 2005)。在垂直方向上, 以水深 200 m 为界存在 2 个热泉生物群落类型(Tarasov *et al.*, 2005); 专属于热喷泉口的生物“种”在 200 m 水深位置出现明显分异, 大于此深度的海底生物群落中具有更高比例的专属热泉喷口的生物“种”, 这部分生物群落中缺少硅藻、藻细菌席和浮游植物; 而生物“属”的分异则出现在水深大约 386 m 深度。

1.1.2 热泉生物量估算 热泉生物通常具有很高的丰度, 密度可达 50 kg/m², 是周边海洋环境生物量的 103~104 倍(Prieur, 1997)。黑烟囱周围的嗜热和超嗜热微生物的密度高达 108~109 个/mL(冯军等, 2005)。然而, 不同海区热泉生物的分布面积及其生物种类存在差异。单个热泉喷口的生物群落区域通常少于几百平方米, 以热泉口为中心向四周呈带状展布。黑烟囱表面大多被一些厚达数厘米的白色到浅黄色细菌席覆盖。海底热泉喷口的寿命一般只有十几年到几十年。当一个热泉喷口“死亡”后, 微生物及其营生的喷口宏体生物也将随之死亡。由于处于特殊环境, 宏体生物“遗骸”很少有机会被后来生命“吃”掉, 因而更容易被保存下来转化为沉积有机质, 进而被进一步改造后参与油气的形成。个别生物也可以迁移到相隔数十到数百公里之外的新喷口生活(Marsh *et al.*, 2001; Pradillon *et al.*,

2001; 冯军等, 2005; Nussbaumer *et al.*, 2006), 使得一些热泉喷口的生物得以长期生存下来, 从而积累起大量有机体。

1.2 冷泉微生物活动及数量估算

1.2.1 冷泉微生物种类和分布特征 自第一个海底冷泉 1984 年首次报道后(Paull *et al.*, 1984), 迄今全球已至少发现共 24 处海底冷泉。冷泉流体一般含有大量甲烷气体, 在海底表面通常表现为泥火山, 喷口附近发育独特的营甲烷化能自养生物群落, 下伏的沉积物中通常伴有天然气水合物, 在更深部位则通常为油气藏。海底冷泉微生物以化能自养细菌和古细菌为主, 它们能与冷泉中化学气体(甲烷、硫化氢等)发生化学反应, 把碳氧化物还原成有机碳获得能源。它们通常贴附在沉积物表面形成细菌席, 或与其他生物内共生。根据类脂生物标志化合物、16SrDNA 分子序列和 DNA 分子探针荧光原位杂交(FISH)分析, 冷泉微生物主要是 ANME-2 族的厌氧甲烷氧化古细菌和硫酸盐还原细菌(脱硫八叠球菌属 *Desulfosarcina* 和脱硫球菌属 *Desulfococcus* 细菌)的共栖互养体(Syntrophism)(图 1), 其次为 ANME-1 族厌氧甲烷氧化古菌(Hinrichs *et al.*, 1999; Orphan *et al.*, 2001, 2002; Boetius and Suess, 2004; Zhang and Lanoil, 2004; 党宏月等, 2006)。同时, 这些冷泉化能自养微生物又为冷泉口附近的宏体生物提供食物, 营生了冷泉背景下至少 117 个属 211 个种的宏体生物群落, 主要类型包括海绵、腔肠、须腕、软体、节肢、腕足、棘皮、苔藓虫、有孔虫和脊椎动物门等。

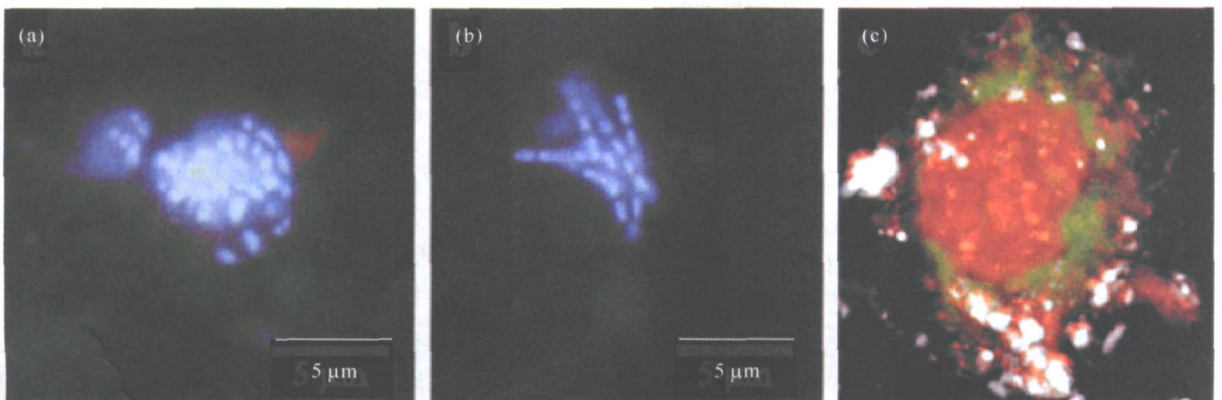


图 1 冷泉营甲烷古细菌显微照片

Fig. 1 Microphotographs of methanotrophic archaea in cold venting

a 为 ANME-2 族古细菌集合体; b 为 ANME-1 族古细菌集合体; c 为古细菌(红色)、硫酸盐还原细菌(绿色)和方解石(白色)集合体(Boetius and Suess, 2004)

冷泉生物群落分异度随海水深度增加而降低. 在同一深度范围内, 松软沉积物底质相对于硬底质沉积物表现出更高的分异度. 此外, 冷泉生物群落的分异度与冷泉的流动状况也有关系. 一般而言, 持续较长时间的流体源、较高的流速和流体中含较高甲烷/硫化氢浓度的冷泉环境通常具有更高的生物分异度. 我国南海北部二个冷泉口的微生物细胞密度统计结果表明, 微生物细胞密度与甲烷浓度之间存在明显正相关性(苏新等, 2007).

1.2.2 冷泉生物量估算 冷泉生物群落的总生物量与冷泉流体通量的强度关系密切, 规模和数量相差悬殊. 从每平方米数百公斤至几公斤不等. 例如, 秘鲁海槽的冷泉流量为 $441 \text{ L/m}^2/\text{day}$, 冷泉群落中双壳类生物数量达到了 30 kg/m^2 . 东北太平洋 Cascadia 大陆边缘 Hydrate Ridge 海区的一种蛤(*Calypptogena*)的密度为 150 g/m^2 , 相当于有机碳密度约为 35 g/m^2 (Boetius and Suess, 2004); 硫化物氧化菌(*Beggiatoa*)的密度为 500 g/m^2 , 相当于有机碳密度约为 25 g/m^2 (Boetius and Suess, 2004); ANME-2 族的营甲烷古细菌和硫酸盐还原细菌的丰度高达 10^{10} 个细胞/mL 沉积物. 相比之下, 中国南海北部陆坡冷泉口沉积物中微生物细胞密度大约为 10^6 个/g, 而喷口周围沉积物中微生物细胞密度下降为 10^5 个/g(苏新等, 2007). 此外, 单个冷泉点或不同冷泉口之间的流体喷出速度变化大, 空间分布不均匀, 导致冷泉群落在海底呈点状或布丁状分布. 一个小的冷泉喷出管道可能只形成不足 20 m^2 的生物群落面积, 而大规模的冷泉区域则能形成 $1000 \sim 6000 \text{ m}^2$ 的生物群落面积.

1.3 其他海洋极端环境微生物活动及数量估算

现代一些深海盐跃层(halocline)附近发育有大量嗜盐微生物(原核生物)群落. 例如, 在地中海东部 Bannock 盆地海区, 水深大约 3.3 km 处发育一个 2.5 m 厚的化变层(chemocline), 界于下伏高盐度卤水与上覆海水之间的过度带, 其内发育有大量细菌, 包含 4 个新细菌分支种类(Daffonchio *et al.*, 2006). 在这一狭窄的化变层内, 新陈代谢活动异常活跃, 细菌依靠下伏卤水中的甲烷和上覆海水中的有机颗粒生存, 细胞密度达到 10^6 个/mL(相比之下, 上覆和下伏海水层的细胞密度只有 10^4 个/mL), 被誉为深海的微生物“绿洲”. 据推测, 这类高丰度微生物卤水层可稳定存在数百年时间, 能产生大量有机质沉淀, 形成类似于腐殖泥之类的沉积记

录, 最终可能演变成一种潜在的优质烃源岩(Daffonchio *et al.*, 2006).

2 海洋极端微生物活动对油气资源形成与改造关系探讨

2.1 极端微生物活动参与油气资源的形成

极端微生物活动直接或间接地参与了油气资源的形成. 极端微生物的有机体本身可能是一种良好的生烃母质, 其周围靠微生物生长的宏体生物的“遗骸”有机体由于处于相对极端沉积环境, 更容易被保存下来变成沉积有机质, 进而可能被厌氧微生物进一步降解而参与生烃过程(Wilson, 1990; Horita and Berndt, 1999; Brasier *et al.*, 2002; Lollar *et al.*, 2002; 王万春和陶明信, 2005). 虽然, 这类油气在形成后可能不易被保存, 但仍会有一些油气以原生包裹体形式保存在同生矿物内, 或以沥青质残留在空隙中(Rasmussen and Buick, 2000), 它们对探讨地球早期极端环境下油气成因意义重大. 有些极端微生物活动可直接参与油气资源形成. 例如, 产甲烷菌(古细菌)活动所产生的甲烷气体可直接形成气田和天然气水合物矿藏. 资源量巨大的海洋天然气水合物的气体来源主要为微生物成因的甲烷气体. 据美国地质调查局估算, 全球约有 $1/4$ 未被发现的油气资源储存在北极附近, 大多数以天然气水合物形式存在, 其成因与冷泉极端微生物活动有关(Krajick, 2007).

现代海洋极端环境微生物活动通常与油气资源伴生(或共生), 微生物活动痕迹可以作为一种良好寻找油气矿藏的标志. 通常在冷泉地质背景下垂向上具有三层楼模式: 在沉积物表面极端微生物活动异常活跃一向下进入水合物储集层一再向深部富含油气藏. 例如, 东北太平洋 Cascadia 大陆边缘 Hydrate Ridge 海区是微生物参与水合物形成的经典地区, 微生物活动直接产生了大量甲烷气体, 密度高达 $6.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (Fink and Spence, 1999), 形成了大量甲烷水合物(Boetius and Suess, 2004). 渗漏的甲烷营生了海底表面厚达 0.3 cm 的细菌席(硫化物氧化菌 *Beggiatoa*)和大量宏体生物(例如, 蛤 *Calypptogena pacifica*, *Calypptogena kilmeri* 等), 使得沉积物中有机碳含量高达 60 g/m^2 . 再如, 黑海底部与甲烷氧化细菌有关的特殊生物地球化学过程异常

活跃(Kruglyakova *et al.*, 2004), 天然气水合物出现在浅表层沉积中, 微生物活动与海底冷泉、泥火山和液化沉积流(底劈)活动紧密关联, 共同反映黑海海底油气资源的迁移特征. 近年实验还表明, 黑海沉积物本身在微生物作用下也可产生大量甲烷气体, 夏季产气速度可高达 $559 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ (Rusanov *et al.*, 2002), 说明微生物活动在一些极端环境下可明显促成烃类气体的形成. 墨西哥湾海底沉积物中细菌分子化石研究证实, 冷泉处的磷脂酸(PLFA)含量明显高于非冷泉位置(Li *et al.*, 2007), 微生物群落与天然气水合物和细菌席的空间分布特征一致, 并随地球化学背景差异而变化.

2.2 极端微生物活动参与油气资源的改造

油气的形成主要受时间、温度和有机质组分影响(Seewald, 2003). 大多数沉积盆地油气开始形成时的温度约 50°C , 深度大于 1 km . 因此, 油藏环境也是一种极端环境. 油藏环境中发现的大量氧化菌、硫酸盐还原菌和甲烷生成菌等微生物活动迹象表明, 极端微生物活动可能参与了油气资源的改造(Krejci-Graf, 1932; 刘金峰和牟伯中, 2004; 王万春和陶明信, 2005). 一些极端微生物依赖原油中脂肪烃和低碳数气态烃类生存, 其活动减少了原油中烃类组分和湿气组分, 增加了原油密度、硫含量、酸度和粘度(王万春和陶明信, 2005). 然而, 在温度超过 80°C 地下深处, 原油中的烃和其他组分会被一些极端嗜热微生物降解而成为“重”油(Ian *et al.*, 2003), 产生大量甲烷气体, 使其成为可被开采对象. 研究发现, 一些极端微生物降解作用似乎也可以对油藏起到“消毒”作用, 能够使得那些曾遭受过微生物降解的深埋油藏在上升折返到地表浅处后, 不再被后来的微生物降解或改造(Wilhelms *et al.*, 2001).

2.3 地史早期海洋极端微生物活动与油气资源形成探讨

地史早期海洋环境类似于现代海洋的极端环境, 研究现代海洋极端环境有助于探索地史早期海洋极端微生物活动与油气资源的关系. 现有资料表明, 地史时期海洋极端微生物活动与油气资源的关系可追溯太古代、元古代和早寒武世时期, 海洋极端微生物很可能是地球早期油气资源形成的主要有机母质. Rasmussent and Buick (2000) 和 Rasmussent (2005) 报道了澳大利亚 $32\sim 26.3$ 亿年前太古代地层中发现了含油气的流体包裹体和焦沥青, 认为那

时的微生物活动就参与了油气资源的形成. 尽管具体形成机制尚不清楚, 但认为非传统的生物源有机分子可能是太古代油气的主要烃源. Dutkiewicz *et al.* (2006) 报道了加拿大 Elliot 湖地区 24.5 亿年前 Matinenda 组河流相变质砾岩中含油气流体包裹体分子的地球化学研究, 认为包裹体形成于大约 22 亿年之前的成岩作用和变质作用早期. 发现了大量的藻青菌和真核生物分子化石, 证明一些微生物可以存活于地史早期极端环境下, 并可能成为重要的烃源有机母质. Dutkiewicz *et al.* (2003) 还利用气相色谱仪报道了澳大利亚 Roper 盆地区 14.3 亿年海相 Roper 群中石油流体包裹体, 在十分成熟的石油包裹体内发现了大量藻青菌分子化石, 证明早期微生物活动可能是烃源有机母质. 此外, Bons *et al.* (2004) 从澳洲南部 585 Ma 年龄钙质页岩的碳酸钙细脉内识别出了类似于现代嗜热古菌 *Pyrodictium* 的微生物构造和化学组成, 认为它们可能参与了上述碳酸钙细脉的形成, 而这类微生物现今繁盛在温度达 $80\sim 120^\circ\text{C}$ 的热泉和油井中.

我国华南前寒武纪的海洋环境类似于现代海洋的极端环境. 近来研究表明, 晚元古代“雪球”事件结束后广泛沉积的一套具有极低碳稳定同位素和其他自生矿物学特征的“盖帽”白云岩, 其成因与甲烷冷泉事件有关(Jiang *et al.*, 2003, 2006; 王家生等, 2005; 李清等, 2006). 最近发现这套冷泉碳酸盐岩中含有数条沥青质细脉, 细脉的碳稳定同位素值最低达 -48‰ PDB , 说明其成因与甲烷源事件有关. 目前在华南地区晚元古代大陆边缘, 记录冷泉事件的地质剖面至少已发现了 3 个. 类似的冷泉事件地质记录也发现在华南地史更早时期的大塘坡组(周琦等, 2007). 因此, 有理由认为在晚元古代陡山沱早期, 甚至更早的大塘坡时期, 华南大陆边缘海底曾广泛发育冷泉系统, 该冷泉系统的相关沉积物(层)很可能是一个优质的潜在烃源岩. 此外, 华南寒武系下部普遍发育黑色页岩层和 Mo—Ni 多金属元素富集层, 有报道发现喷口生物群(杨瑞东等, 2005), 认为其沉积环境类似于现代海洋热泉背景, 可能是探索地史早期热泉极端微生物活动与油气资源关系的重要层位.

3 初步结论

(1) 海洋极端微生物类型主要为细菌和古细菌,

热泉微生物群落主要为异养发酵菌、硫酸盐还原菌、产甲烷菌等生物群落;冷泉微生物群落主要为 ANME-2 族的厌氧甲烷氧化古细菌和硫酸盐还原细菌和 ANME-1 族厌氧甲烷氧化古菌;它们可利用 CH_4 和 H_2S 等气体进行能量固定,具有较高的生物丰度和较低的分异度,具有垂向和水平分带性,并能营生一套独特的宏体生物。

(2) 极端微生物活动直接或间接参与油气资源的形成和改造,极端微生物活动可以作为油气资源找矿标志之一。极端微生物的有机体本身可能是一种良好的生烃母质,产甲烷菌(古细菌)活动所产生的甲烷气体可直接形成气田和天然气水合物,其周围靠微生物生长的宏体生物的“遗骸”有机体易于被保存下来变成沉积有机质,进而也参与生烃过程。极端微生物活动可能参与了整个油气的产生、运移、圈闭和后期改造过程,其活动记录可示踪油气藏的迁移或演化过程。极端微生物活动导致的局部油气资源也可能上升到上覆其他层位,或侧向转移到其他部位后再成藏。原始“点”状展布的海底冷泉和热泉附近的烃类物质随着沉积埋藏加深,可能发生垂向或侧向转移后富集形成更大规模油气藏。

(3) 华南地史时期陡山沱早期(极可能的大塘坡早期)大陆边缘海底发育冷泉系统;寒武系下部可能发育热泉系统,是探讨华南地史早期海洋极端微生物活动与烃源岩形成的重要层位。

References

Baross J. A., Hoffman S. E., 1985. Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life. *Origins Life*, 15: 327—345.

Boetius A., Suess, E., 2004. Hydrate ridge: A natural laboratory for the study of microbial life fueled by methane from near-surface gas hydrates. *Chemical Geology*, 205: 291—310.

Bons, P. D., Montenari, M., Hartmann, D., et al., 2004. Fossil microbes in late Proterozoic fibrous calcite veins from Arkaroola, South Australia. In: Geological Society of America, 2004 annual meeting, Anonymous. Abstracts with Programs—Geological Society of America (November 2004), 36(5): 475.

Brasier M. D., Green, O. R., Jephcoat, A. P., et al., 2002. Questioning the evidence for earth's oldest fossils. *Nature* 416: 76—81.

Chen, J., Lian, B., Wang B., et al., 2006. The occurrence and biogeochemistry of microbes in extreme environments. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 199—207 (in Chinese with English abstract).

Daffonchio, D., Borini, S., Brusati, T., et al., 2006. Stratified prokaryote network in the oxic-anoxic transition of a deep-sea halocline. *Nature* 440: 203—207.

Dang, H. Y., Li, T. G., Zeng Z. G., et al., 2006. Microbiological studies on sub-sea floor deep biosphere in deep sea extreme environments. *Studia Marina Sinica*, 47: 41—60 (in Chinese with English abstract).

Deming J. W., Baross J. A., 1993. Deep-sea smokers: Windows to a sub-surface biosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 3219—3229.

Dutkiewicz, A., Volk, H., George, S., et al., 2006. Biomarkers from Huronian oil-bearing fluid inclusions: An uncontaminated record of life before the Great Oxidation Event. *Geology*, 34(6): 437—440.

Dutkiewicz, A., Volk, H., Ridley, J., et al., 2003. Biomarkers, brines, and oil in the Mesoproterozoic Roper Superbasin, Australia. *Geology*, 31(11): 981—984.

Feng J., Li, J. H., Niu, X. L., 2005. Research advances in hydrothermal vent microbial communities and its significance for geology. *Advances in Earth Science*, 20(7): 732—739 (in Chinese with English abstract).

Fink, C. R., Spence, G. D., 1999. Hydrate distribution off Vancouver Island from multifrequency single-channel seismic reflection data. *J. Geophys. Res. (Solid Earth)*, 104: 2909—2922.

Furnes, H., Banerjee, N. R., Muehlenbachs, K., et al., 2004. Early life recorded in archaean pillow lavas. *Science*, 304(5670): 578—581.

Hinrichs K. U., Hayes J. M., Sylva S. P., et al., 1999. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 398(6730): 802—805.

Horita, J., Berndt, M. E., 1999. Abiogenic methane formation and isotopic fractionation under hydrothermal conditions. *Science*, 285: 1055—1057.

Lian, M., Head, D., Martin J., et al., 2003. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil. *Nature* 344—352.

IPSC, 2001. Earth, oceans and life: Integrated ocean drilling program, initial science plan, 2003—2013. IWG Supporting Office, Washington DC, 110.

Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426: 822—826.

- Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., et al., 2006. Stratigraphy, sedimentary structures, and textures of the late Neoproterozoic Doushantuo cap carbonate in South China. *Journal of Sedimentary Research*, 76: 978—995.
- Krajick, K., 2007. Race to plumb the frigid depths. *Science*, 315: 1525—1528.
- Krejci-Graf, K., 1932. Rule of density of oils. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 16: 1038.
- Kruglyakova, R. P., Byakov, Y. A., Kruglyakova, M. V., et al., 2004. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor. *Geo-Mar. Lett.*, 24: 150—162.
- Li, Q., Wang, J. S., Chen, Q., et al., 2006. Barite within the cap dolomite in Three Gorges area and its palaeogeographic meaning. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 36(special issue): 196—200 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Peacock, A. D., White, D. C., et al., 2007. Spatial patterns of bacterial signature biomarkers in marine sediments of the Gulf of Mexico. *Chemical Geology*, 238: 168—179.
- Liu, J. F., Mu, B. Z., 2004. Extreme environment of oil reservoir and associated microorganisms. *Journal of Microbiology*, 24(4): 31—34 (in Chinese with English abstract).
- Lollar, S. B., Westgate, T. D., Ward, J. A., et al., 2002. Abiogenic formation of alkanes in the earth's crust as a minor source for global hydrocarbon reservoirs. *Nature* 416: 522—524.
- Margesi, R., Schinner, F., 2001. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 56: 650—663.
- Marsh, A. G., Mullineaux, L. S., Young, C. M., et al., 2001. Larval dispersal potential of the tubeworm *Riftia pachyptila* at deep-sea hydrothermal vents. *Nature*, 411: 77—80.
- Nussbaumer, A. D., Fisher, C. R., Bright, M., 2006. Horizontal endosymbiont transmission in hydrothermal vent tubeworms. *Nature* 441: 345—348.
- Orphan, V. J., House, C. H., Hinrichs, K. U., et al., 2001. Methane-consuming archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis. *Science*, 293(5529): 484—487.
- Orphan, V. J., House, C. H., Hinrichs, K. U., et al., 2002. Multiple archaeal groups mediate methane oxidation in anoxic cold seep sediments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(11): 7663—7668.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., Wellsbury, P., 2000. Recent studies on bacterial populations and processes in sub-seafloor sediments; A review. *Hydrogeological Journal*, 8(1): 11—28.
- Paull, C. K., Hecker, B., Commeau, R., et al., 1984. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science*, 226: 965—967.
- Paull, C. K., Schlining, B., Ussler III, W., et al., 2005. Distribution of chemosynthetic biological communities in Monterey Bay, California. *Geology*, 33(2): 85—88.
- Pradillon, F., Shillito, B., Young, C. M., et al., 2001. Developmental arrest in vent worm embryos. *Nature* 413: 698—699.
- Prieur, D., 1997. Microbiology of deep-sea hydrothermal vents. *Marine Biotechnology*, 15: 42—244.
- Rasmussen, B., 2005. Evidence for pervasive petroleum generation and migration in 3.2 and 2.63 Ga shales. *Geology*, 497—500.
- Rasmussen, B., Buick, R., 2000. Oil old ores: Evidence for hydrothermal petroleum generation in an Archean volcanogenic massive sulfide deposit. *Geology*, 731—734.
- Rothschild, L. J., Mancinelli, R. L., 2001. Life in extreme environments. *Nature* 409: 1092—1101.
- Rusanov, I. I., Lein, A. Y., Pimenov, N. V., et al., 2002. The biogeochemical cycles of methane on the northwestern shelf of the Black Sea. *Microbiology*, 71(4): 479—487.
- Science Committee of ODP China, 2003. Chinese national science plan (2003—2013) for participation in IODP. *Advances in Earth Science*, 18(5): 662—665 (in Chinese with English abstract).
- Seewald, J. S., 2003. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins. *Nature*, 426: 327—333.
- Simoneit, B. R. T., Lonsdale, P. F., 1982. Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas basin. *Nature*, 295: 198—202.
- Su, X., Chen, F., Wei, S. P., et al., 2007. Preliminary study on the correlation between microbial abundance and methane concentration in sediments from cold seeps in the northern South China Sea. *Geoscience*, 21(1): 101—104 (in Chinese with English abstract).
- Takai, K., Gamo, T., Tsunogai, U., et al., 2004. Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyperthermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (HyperSLME) beneath an active deep-sea hydrothermal field. *Extremophiles*, 8(4): 269—282.

- Tarasov, V. G., Gebruk, A. V., Mironov, A. N., et al., 2005. Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities; Two different phenomena? *Chemical Geology*, 224: 5–39.
- Wang J. S., Gan, H. Y., Wei Q., et al., 2005. Stable isotopes of carbon and sulfur of cap dolomite in the Three Gorges and its mechanism discussion. *Geoscience* 19 (1): 14–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang P. X., 2003. Earth system science in China Quo Vadis? *Advances in Earth Science*, 18 (6): 837–851 (in Chinese with English abstract).
- Wang W. C., Tao M. X., 2005. Geomicrobial processes and petroleum resources. *Geological Bulletin of China*, 24 (10–11): 1022–1026 (in Chinese with English abstract).
- Wilhelms, A., Larter, S. R., Head I., et al., 2001. Biodegradation of oil in uplifted basins prevented by deep burial sterilization. *Nature* 411: 1034–1037.
- Wilson, H. H., 1990. The case for early generation and accumulation of oil. *Journal of Petroleum Geology*, 13(2): 127–156.
- Yang R. D., Zhu, L. J., Gao, H., et al., 2005. A study on characteristics of the hydrothermal vent and relating biota at the Cambrian bottom in Songlin, Zunyi County, Guizhou Province. *Geological Review*, 51(5): 481–492 (in Chinese with English abstract).
- You C. F., Bickle, M. J., 1998. Evolution of an active seafloor massive sulphide deposit. *Nature* 394: 668–671.
- Zhang, C. L., Lanoil B., 2004. Geomicrobiology and biogeochemistry of gas hydrates and cold seeps. *Chemical Geology*, 205(3–4): 187–194.
- Zhang, M., Dong X. Z., 2006. A survey of extremophiles project supported by 973. *Acta Microbiologica Sinica*, 46(2): 336 (in Chinese).
- Zhou, Q., Du Y. S., Wang J. S., et al., 2007. The characteristics and significance of the cold seep carbonates from Datangpo Formation, Nanhua Series in the northeast of Guizhou. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 339–346 (in Chinese with English abstract).
- 陈骏, 连宾, 王斌, 等, 2006. 极端环境下的微生物及其生物地球化学作用. *地质前缘*, 13(6): 199–207.
- 党宏月, 李铁刚, 曾志刚, 等, 2006. 深海极端环境深部生物圈微生物学研究综述. *海洋科学集刊*, 47: 41–60.
- 冯军, 李江海, 牛向龙, 2005. 现代海底热液微生物群落及其地质意义. *地球科学进展*, 20(7): 732–739.
- 李清, 王家生, 陈祈, 等, 2006. 三峡“盖帽”白云岩中重晶石研究及其古地理意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 36 (专辑): 196–200.
- 刘金峰, 牟伯中, 2004. 油藏极端环境中的微生物. *微生物学杂志*, 24(4): 31–34.
- 苏新, 陈芳, 魏士平, 等, 2007. 南海北部冷泉区沉积物中微生物丰度与甲烷浓度变化关系的初步研究. *现代地质*, 21 (1): 101–104.
- 王家生, 甘华阳, 魏清, 等, 2005. 三峡“盖帽”白云岩的碳、硫稳定同位素研究及其成因探讨. *现代地质*, 19(1): 14–20.
- 汪品先, 2003. 我国的地球系统科学研究向何处去. *地球科学进展*, 18(6): 837–851.
- 王万春, 陶明信, 2005. 地质微生物作用与油气资源. *地质通报*, 24(10–11): 1022–1026.
- 杨瑞东, 朱立军, 高慧, 等, 2005. 贵州遵义松林寒武系底部热液喷口及与喷口相关生物群特征. *地质论评*, 51(5): 481–492.
- 张敏, 东秀珠, 2006. 973 项目“极端微生物及其功能利用的基础研究”研究进展. *微生物学报*, 46(2): 336.
- 中国大洋钻探学术委员会, 2003. 中国加入综合大洋钻探 (IODP) 科学计划(2003–2013). *地球科学进展*, 18(5): 662–665.
- 周琦, 杜远生, 王家生等, 2007. 黔东南地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 339–346.