

南海北部油气化探研究——以甲烷浓度为例

王庆光^{1,2,3}, 徐瑞松¹, 王洁⁴, 陈彧^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 广东水利电力职业技术学院 水利工程系, 广东 广州 510635; 4. 华东师范大学 河口海岸研究所, 上海 200062)

摘要: 利用油气化探方法分析南海北部采样点海水中的甲烷气体的浓度, 发现在甲烷浓度分布图中有 7 个异常高的位置, 其中的一些区域已经探明有油气藏的存在, 结果表明通过海水甲烷浓度来探测油气藏是可行的, 对今后的海洋油气探测具有重要的指导意义。

关键词: 油气化探; 甲烷; 烃类渗漏

中图分类号: P744

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)06-0009-07

油气地球化学勘探(简称油气化探)是在石油地质学和地球化学基础上发展起来的一门综合性油气资源勘查应用科学^[1]。油气化探作为一种油气勘探技术方法, 已被列入中国油气资源勘查技术方法系列, 它以地质研究为指导, 以岩石、近地表土壤、地下水、海底沉积物、海水中气体等为研究介质, 用微量或超微量测试手段检测深部油气藏运移至近地表(或海表)的烃类及其蚀变产物和油气伴生物, 并以这些检测结果为基础资料, 通过对测试分析结果进行综合分析, 指出油气聚集的远景区带或有利部位, 为区域含油气远景、有利油气集聚区带以及圈闭含油气情况的评价和最终部署钻井提供地化依据, 为油气田的勘探和开发服务^[2]。

1 海洋油气化探

1.1 理论基础

海底烃类渗漏是海洋环境的普遍现象, 对于油气资源勘探和全球气候变化研究具有重要意义。地下油气藏中的烃类因向地表方向运移而在油气藏上方形成包括烃类组分和浓度在内的一些异常效应。海域油气藏中的烃类组分同样会向上运移, 从而在海域形成一系列渗漏烃异常效应。海域渗漏烃异常效应主要表现为海底沉积物烃浓度异常、海水烃浓度异常以及海面油膜的广泛发育。渗漏烃已经成为海域油气勘探中不可缺少的测量指标, 尤其是在缺乏钻井资料的较深水区, 渗漏烃的检测是评价海上油气远景区为数不多的重要方法之一。

1.2 海洋油气化探指标

海洋油气化探已经经历了近 50 年发展历程, 在地球化学探测方法上, 已经从单一的海水烃类组分测定, 发展到海底表层沉积物、海水以及海面低空大气等多介质油气地球化学探测方法^[3-6]。在国外采用的油气化探分析指标以烃类为主, 包括烃类气体、中等分子烃类和高分子重烃类以及各种烃类的同位素分析等。非烃类指标如微生物、碳的含量变化等也得到了有效的应用。中国海洋油气化探工作是尝试地球化学指标最多的国家之一。目前已经采用的地球化学指标包括烃类气体(酸解烃、顶空气、热释烃)、吸附丝、紫外光谱、荧光光谱(二维荧光光谱和三维荧光光谱)、全萃取气相色谱、生物标志物以及各种烃类的同位素等直接与烃类有关的指标, 还包括热释汞、微生物、磁化率、微量元素、特征矿物、可溶性铁比值、碳的含量变化、CO₂ 和放射性气体等指标。

1.3 海底渗漏烃的来源

海底渗漏烃的来源主要包括来自海底生物成因和深部油气渗漏的烃类, 也包括二者的混合, 因此海底烃类渗漏的成因可分为生物成因、热成因以及热成因与生物成因的混合成因。对深部油气具有指

收稿日期: 2009-05-12; 修回日期: 2010-03-29

基金项目: 国家重点研究项目(2007CB41170501)

作者简介: 王庆光(1976-), 男, 江西泰和人, 博士研究生, 讲师, 主要从事地球化学研究, 电话: 15918600708, E-mail: ths96412@163.com

示意的烃类渗漏主要是热成因或混合成因渗漏。利用烃类气体及同位素组成能够指示渗漏烃的来源。在烃类气体中,甲烷可以是热成因也可以是生物成因,而重烃气体(乙烷、丙烷、丁烷、戊烷)主要来自热成因源区^[7]。生物成因的烃类主要为气体并且以甲烷气体为主。热成因烃类气体组分中甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等均具有一定比例。

2 化探指标的选择

在海底烃类渗漏区,烃会从沉积物中渗漏到海水中形成烃类异常显示。在海洋环境,海水是最早用于检测海底烃类渗漏的介质。海水柱不仅可抑制细菌对烃的氧化作用,而且提供了观察渗漏现象的绝好介质,肉眼或借助仪器可以很容易识别出在海水及其表面的渗漏显示。并且海底尤其是深海海底沉积物岩芯采集费用很高,技术难度大,所以海水中烃渗漏异常的检测有很大的优势。海水采集容易,并且海水烃浓度的分析方法简单容易,海水烃浓度分析是比较经济、方便的海上油气化探技术。

油气圈闭内的惰性气体甲烷由于微渗漏沿构造裂隙上升到海底,之后由于其浮力作用继续向上迁移。油气区甲烷气体的含量明显较周围海水高,所以通过探测海水中甲烷的存在,可寻找和发现活动的油气资源。海底存在油气资源及其渗漏活动的关键证据之一,是海水中出现高异常含量的甲烷。

海底油气发生微渗漏后,甲烷气能否到达海表面?事实证明是可以的^[8]。海底环境因素发生改变,油气资源的烃类会发生分解,分解后的甲烷等烃类

气体向海表面运移。甲烷等烃类气体上升过程中会受到上升流和洋流等作用的影响,致使甲烷等气体不能垂直于海底油气富集带向海表面上升,相对于海底油气资源富集带,海面甲烷气异常带的位置会有一定程度的偏移。但对南海等油气田的分布进行探测和圈定发现,多数油气田的面积都很大,并且由前人对南海进行的化探发现化探异常特点的形成与区域内地温梯度高、地层压力梯度大,与新生代拉张应力作用伴生的断裂及热流体上倾活动引起的烃类垂向微运移有关,所以,在海面探测到的甲烷气的分布与油气资源在海底的分布可以对应起来,所以本文选取海水中甲烷气体的浓度作为南海油气化探检测指标。

3 南海北部海水表层甲烷的测定

南海北部边缘盆地广阔,发育有一系列新生代盆地(个别地区有中生代残留盆地),海域水深在50~3 000 m之间。按巴西等国家采用的以300 m水深作为浅水区和深水区界限的标准,这些盆地可分为3类:(1)全部发育在浅水区的盆地,包括北部湾盆地和莺歌海盆地;(2)跨越浅水区和深水区的盆地,包括台西南盆地、珠江口盆地和琼东南盆地;(3)完全处于深水区的盆地,包括中建南盆地、中沙西南盆地和笔架南盆地等^[9]。

作者于2007年8月随“实验3号”调查船对南海北部进行了调查,调查海区及站位如图1所示。其中包括7个断面,在110°~120°E、18°~23°N的范围内布设了56个站位点。每个站位采集了表层海水样

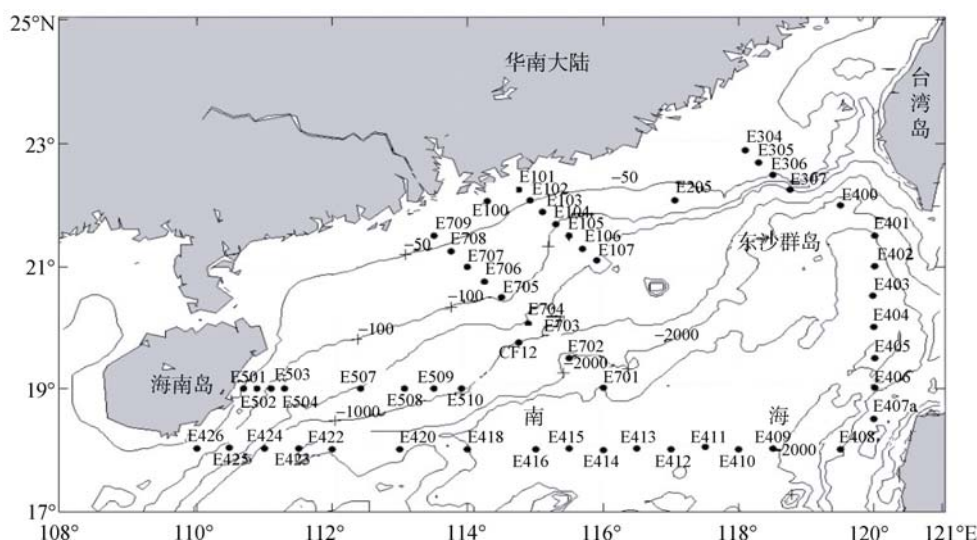


图1 南海北部研究区采样点分布

Fig. 1 Sampling points in the northern South China Sea

品,对南海北部海水表层中的甲烷气体的浓度进行分析,为研究海域油气资源勘探和评价提供地球化学依据。

3.1 样品的采集和保存

为避免由船本身燃油造成的污染,当船一停稳就开始立即采集水样,并且是在船头部位采集。海水样品用 10 L 塑料桶采集,现场用一头带有玻璃管的管或虹吸管将水样分装到已准确校正过体积的玻璃瓶中。橡皮管要求半透明,以便观察管中是否有气泡,玻璃管管口要大小适中,既要能顺利地把管中的气泡排掉,又要能迅速采水。首先用少量海水冲洗瓶子两遍,然后把玻璃管插到瓶底,让海水注入,注入速度要快,但又不使瓶中水流产生大的涡流。当水装满并且溢出约瓶体积的一半时,慢慢抽出玻璃管,再用塑料注射器吸取 1 mL 饱和 HgCl_2 ,快速加入液面以下,然后将一插有 5 号注射器针头的反口橡皮塞迅速塞上并旋紧,将多余的水通过针头排出,最后将样品瓶上下颠倒几次,以使 HgCl_2 均匀分散开。每份样品采双样,样品采集后应倒立并放在遮光的箱子内保存。由于加入的 HgCl_2 浓度较低,因此对 CH_4 的溶解度影响较小,可以忽略。如此处理和保存的样品可以放置 2 个月左右^[10]。

3.2 溶解甲烷的分析测定步骤

海水样品中溶解甲烷浓度测定采用气体抽提法测定,该测定方法主要由起泡、收集(吸附)、解吸和

测定 4 个步骤组成。测定时首先将 100 mL 的水样用高纯 He 转移到底部有砂心玻璃板的玻璃抽提室中,然后将高纯 He 以 80 mL/min 的流量从抽提室底部通入吹扫 8 min,抽提气经砂心玻璃板时产生大量细小气泡,并将水体中气体吹扫出。吹扫气体经 K_2CO_3 干燥管除去水蒸气,再经过装有 20~30 目的 Ascarite(II)(ThomasScientific, USA)的吸附管去除二氧化碳,最后富集于内填有活性炭(80~100 目,后同)分子筛并置于液氮中的不锈钢吸附管中,He 气排放到大气中。提取过程结束后,改变 He 气气路,进入色谱,把吸附管放入沸水浴将吸附管迅速加热,被吸附的甲烷经解析并进入气相色谱仪(安捷伦 6820,经装有 80~100 目 Porapak Q 并置于 50 的色谱柱(3 m × 3 mm)分离),然后由 FID 检测器检测。保留时间大约为 3 min。检测器信号采用 $55 \times 10^{-6} \text{CH}_4/\text{He}$ 标气(国家标准物质中心)校正。将固定体积的甲烷标准气体注入空白水样(空白水样用高纯 He 吹扫之后得到)用相同的提取方法测定,气体的回收率大于 90%。本实验用约 5 nmol/L 的溶解甲烷海水样品重复实验 6 次,进行精密度实验测定,得标准偏差小于 6%。

3.3 海水中溶解 CH_4 的测定结果

经过 2007 年 8 月南海航次调查采样及实验测定表明,南海北部表层海水中甲烷的浓度范围为 2.69~41.65 nmol/L(表 1)。

表 1 各采样点的海水中甲烷浓度

Tab.1 Methane concentrations in seawater at different sampling points

站位	甲烷浓度 (nmol/L)	站位	甲烷浓度 (nmol/L)	站位	甲烷浓度 (nmol/L)	站位	甲烷浓度 (nmol/L)
CF12	41.65	E400	7.21	E414	3.731	E507	12.88
E100	18.27	E401	13.16	E415	3.199	E508	3.57
E101	10.43	E402	4.053	E416	2.688	E509	10.64
E102	6.37	E403	14.35	E418	3.332	E510	8.82
E103	9.59	E404	14.91	E420	3.871	E701	8.47
E104	9.10	E405	9.94	E422	4.417	E702	4.76
E105	23.24	E406	5.831	E423	4.263	E703	3.50
E106	7.42	E407a	13.51	E424	4.137	E704	7.21
E107	9.73	E408	6.048	E425	3.752	E705	6.72
E205	13.65	E409	2.744	E426	6.146	E706	3.57
E304	10.85	E410	5.383	E501	22.05	E707	8.47
E305	7.49	E411	6.139	E502	6.02	E708	5.18
E306	9.03	E412	4.354	E503	9.10	E709	6.44
E307	9.31	E413	5.558	E504	7.84	西沙	5.95

近几年来,中国通过大量的海底地质综合勘查工作,在东沙群岛和西沙海槽附近发现了与水合物有关的沉积物和间隙水地球化学异常,同时还找寻到“冷泉”碳酸盐和碳酸盐结核或者结壳,以及标志冷泉生态系统的生物壳体,这些发现揭示了天然气水合物存在的可能性。2007年5月中国在探测到明显甲烷高含量异常的东沙群岛西南神弧海域,成功钻取获得了高纯度天然气水合物实物样品,揭示了南海存在天然气水合物区^[11-15]。

在海底特殊的地质作用下,海底来源的甲烷可造成深层海水出现甲烷含量异常。这种外来输入的甲烷来源主要有:天然气水合物受到扰动分解释放出甲烷^[16],与洋中脊和扩张中心有关的热液体系中蛇纹石化反应生成的大量非生物成因的甲烷,近海底表层油气藏的泄漏等。这些外来输入的甲烷以溶解态或气泡形式由海底进入水柱,造成水体中甲烷气体的含量较正常海水高出数倍、数十倍甚至更高。

综上所述,南海海水中如果出现甲烷的异常,很有可能是由于海底油气藏等资源的泄露,从而可以由甲烷的高含量来指示油气藏的存在。

4 油气化探异常提取

把采样点海水中甲烷浓度作图进行比较分析,提取异常信息。我们从海水深浅和总的南海北部的海水中甲烷分布两个方面来分析。

4.1 浅水区与深水区表层海水中甲烷的分布

按 300 m 作为浅水区和深水区的界限,分别看看两类区域的海水中甲烷气的含量。

由图2与图3可以看出,浅水区海水中甲烷平均浓度大于深水区的平均浓度,这可能是因为油气微渗漏在往海面输送过程中会有一部分损失。所测的甲烷最高浓度是位于深水区的CF12采样点,比一般大洋中的甲烷气体浓度高了近20倍。这一采样点位于珠江口盆地的白云凹陷,与国外一些石油公司勘探预测白云凹陷有大型的油气藏分布相一致。

4.2 南海北部表层海水中甲烷浓度水平分布

测量 56 个点的表层海水中的甲烷气体的浓度,把数据进行线性插值,得出整个南海北部的甲烷水平分布图(图4),由图4可以看出,南海陆架区表层

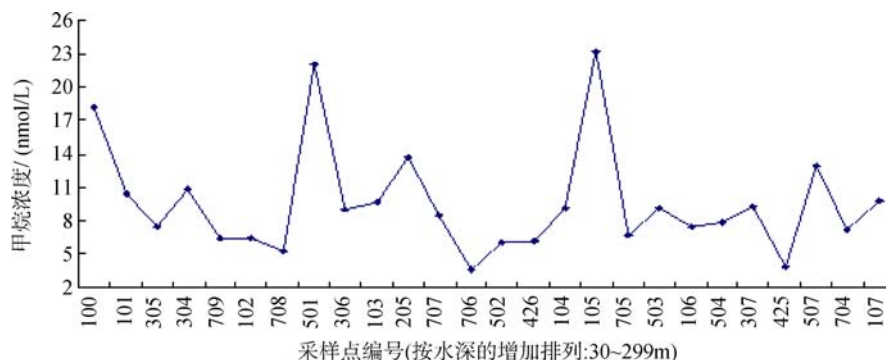


图2 浅水区海水中甲烷浓度

Fig. 2 Methane concentrations in shallow seawater

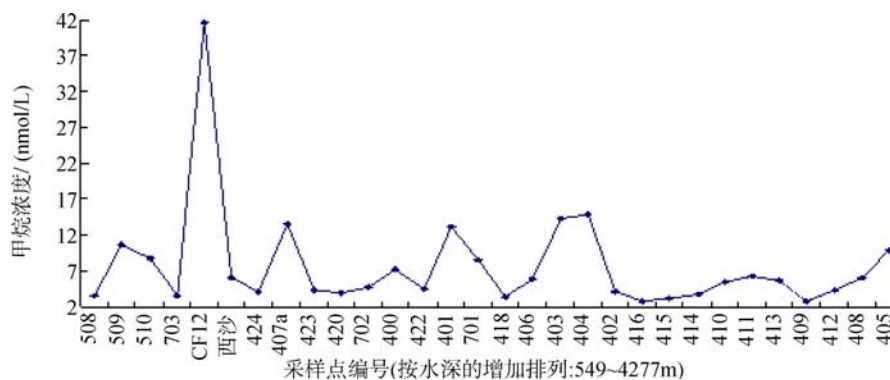


图3 深水区海水中甲烷浓度

Fig. 3 Methane concentrations in deep seawater

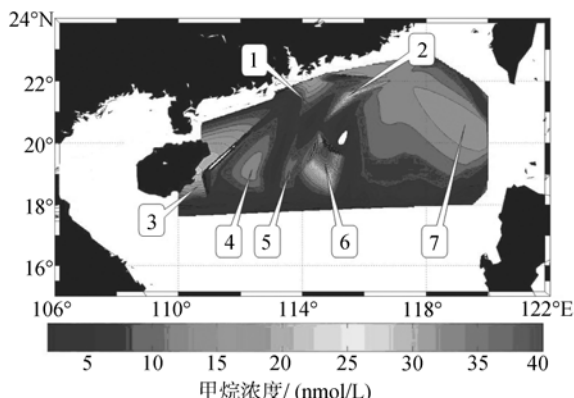


图 4 南海北部研究区表层海水中甲烷浓度水平分布图
Fig. 4 The distribution of methane level concentration in northern South China Sea surface water

海水中甲烷浓度基本上高于海盆区。

虽然采样点比较少，南海北部的范围是如此的广阔，进行线性插值后的图像可能有些地方会失真，但是从这个线性插值的图中还是能获得一些信息。由图 4 中可以看出，除了近岸水体的甲烷浓度较大之外，还有一些突出的亮点区域，表明甲烷的浓度较大，很可能赋存油气藏。

排除近岸高浓度甲烷区域，主要的亮点区域有图 4 中标注的 7 个区域：(1)标志 1 所指的位置对照地质图发现是位于珠江口盆地的西江凹陷和恩平凹陷，其甲烷的浓度较高，最高能接近 10 nmol/L。(2)第 2

个亮点区域大概包括珠江口盆地的惠州凹陷、陆丰凹陷和东沙盆地。其甲烷浓度分布在 15~25 nmol/L 之间。(3)标志 3 所在的高甲烷浓度的位置是属于琼东南盆地的松涛凹陷附近。(4)第 4 个甲烷高浓度区域如图标志 4 标出，是位于珠江口盆地的西部，包括文昌凹陷和神狐隆起，最高的甲烷浓度达到 13 nmol/L。(5)第 5 个甲烷浓度较高的区域也是位于珠江口盆地，包括南部隆起、开平凹陷和顺德凹陷的一部分区域，最高甲烷浓度在 10 nmol/L 左右。(6)标志 6 所在的位置是本次出海考察中甲烷浓度最高，最为异常的区域。此区域甲烷的最高浓度在 40 nmol/L 左右，包括珠江口盆地南部隆起和白云凹陷的大部分地区，还有番禺低隆起与白云凹陷搭界的区域。(7)最后一个甲烷浓度较高的区域大概位于台西南盆地和笔架南盆地的西部，最高甲烷浓度接近 15 nmol/L。并且其附近珠江口盆地的潮汕凹陷区域甲烷的浓度也比较高。

5 南海北部油气藏的分布预测

据莫杰^[17]研究测定，海洋中水样的平均甲烷浓度小于 100 nL/L(4.46 nmol/L)为无油区，大于 200 nL/L(8.93 nmol/L)为含油区，介于两者之间为贫油区。剔除掉近岸的采样点，把其他点根据海水中甲烷浓度这一标准进行油气区分类，得到的结果如表 2 所示(根据表层海水中溶解甲烷的浓度分类)。

表 2 采样点与油气藏分布的关系

Tab. 2 The relationship between the sampling points and distribution of oil and gas reservoir

区域分类	采样点
含油区	CF12, E103, E104, E105, E107, E205, E304, E306, E307, E401, E403, E404, E405, E407a, E507, E509
贫油区	E106, E305, E400, E406, E408, E410, E411, E413, E426, E510, E701, E702, E704, E705, E707, E708, E709, 西沙
无油区	E402, E409, E412, E414, E415, E416, E418, E420, E422, E423, E424, E425, E508, E703, E706

由表 2 结合采样点的地质位置可以发现，含油区主要分布在台西南盆地、笔架南盆地和珠江口盆地的白云凹陷、惠州凹陷、东沙隆起、神狐隆起、西江凹陷、海丰凸起等地质区域。琼东南的松涛西凹陷也是含油区，但是盆地的其他东部地区甲烷浓度较少，已经在琼东南西北部的崖北崖男凹陷探明有油气，但东部区域还没有什么进展，也可能是因为深水区，勘探的技术手段达不到要求。并且深水区从海底微渗漏扩散到海表的甲烷气体有很大的损耗，所以测得的表层海水中甲烷的浓度相对于其他采样点来说比较低。分析可能有两个原因：(1)海底油气藏

的形成和富集需要一定的地质构造条件，一般发育赋存于沉积盆地中，而此断面的盆地分布较少，大多数的采样点都分布在盆地的外围，没有具备油气成藏及形成大中型油气田的基本地质条件，所以很可能这一区域没有油气藏的存在。(2)这些采样点的深度都大于 1 000 m，最深达 4 000 m 多，即使有油气藏的存在，甲烷气体能扩散到海表的浓度会比较低，由于微生物的消耗，水平扩散等诸多复杂的因素，所以还有待测试海底深层水中溶存甲烷的浓度来进一步解释问题。最后得到此地质构造区内的赋存油气藏的情况，结果如表 3 所示。

表 3 各沉积盆地油气藏区的分布

Tab. 3 The distributions of oil and gas reservoir in each sedimentary basin

沉积盆地	采样点	平均甲烷浓度 (nmol/L)	油气区分类	
珠江口 盆地	惠州凹陷	E104, E105, E106	13.25	含油区
	东沙隆起	E107	9.73	含油区
	神狐隆起	E507	12.88	含油区
	顺德凹陷	E508, E509	7.11	贫油区
	南部隆起	E510, E702	6.79	贫油区
	西江凹陷	E707, E708	6.83	贫油区
	恩平凹陷	E706	3.57	无油区
	番禺低隆起	E705	6.72	贫油区
	海丰凸起	E205	13.65	含油区
	白云凹陷	E703, E704, CF12	17.48	含油区
琼东南 盆地	宝岛凹陷	E423, E424	4.20	无油区
	松涛凸起	E425	3.75	无油区
	松涛西凹陷	E426	6.15	贫油区
台西南 盆地	南部隆起	E401	13.16	含油区
	南部凹陷	E400	7.21	贫油区
	中部隆起	E307	9.31	含油区
	北部凹陷	E305, E306	8.26	贫油区
笔架南盆地	E403, E404, E405, E406	11.26	含油区	

6 总结与讨论

表 3 中大多数结果与已经探明的实际情况比较吻合,但是有个别点有些出入。采样点 E706 位于珠江口盆地的恩平凹陷之内,测得其表层海水中甲烷浓度比较低,但是据中国海洋石油总公司的一些探测报告表明,已经在恩平凹陷探明 EP11-1 和 EP18-11 两个油田,还有几个油气显示井。有可能是作者这个点样品的采集测量出现了问题,有待重新测试求证,或者和其他资料进行综合分析。

总体上,根据海水溶存甲烷的浓度来指示海底油气藏的存在还是可行的,虽然也出现一些不确定性,需要进一步验证和其他资料进行多元复合分析,但评价的结果与已经探明的实际情况大部分吻合,表明通过海水中甲烷浓度来探测油气藏,结果值得信赖。

参考文献:

[1] 阮天健,费琪.石油天然气地球化学勘探[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
 [2] 杨育斌,张金来.油气地球化学勘查[M].武汉:中国地质大学出版社,1995.278-286.
 [3] Sackett W M. Use of hydrocarbon sniffing in off shore

exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 243-254.

[4] 程同锦,吴学明.海上油气化探技术现状与建议[J].中国海上油气(地质),1998,12(3):188-192.
 [5] 程军,刘崇禧,赵克斌.我国海域油气化探的基本特点[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(1):83-86.
 [6] 吴传芝,程同锦,朱怀平,等.海洋油气化探研究进展[J].中国海上油气,2006,18(1):22-27.
 [7] Bernard B, Brooks J M, Zumberge J. Determining the origin of gases in near surface sediments[A]. American Association of Petroleum Geologist. Near-Surface Hydrocarbon Migration: Mechanisms and Seepage Rates[C]. Vancouver, BC, Canada: American Association of Petroleum Geologist, 2002. 7-10.
 [8] 中国科学院广州地球化学研究所.陈多福研究员在墨西哥湾实地考察了海底天然气水合物——记中国科学院广州地球化学研究所陈多福研究员[EB/OL]. www.gas-hydrate.org.cn/newspaper/dt_10.htm, 2002-06-12.
 [9] 张功成,米立军,吴时国,等.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报,2007,28(2):15-21.
 [10] 张桂玲.中国近海部分海域溶解甲烷和氧化亚氮的生物地球化学研究[D].青岛:中国海洋大学,2004.
 [11] 杨涛,蒋少涌,葛璐,等.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.
- [12] 刘坚, 陆红锋, 廖志良, 等. 东沙海域浅层沉积物硫化物分布特征及其与天然气水合物的关系[J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 258-262.
- [13] 祝有海, 饶竹, 刘坚, 等. 南海西沙海槽 S14 站位的地球化学异常特征及其意义[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 39-44.
- [14] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 海底天然气渗漏活动的新证据[J]. 科学通报, 2006, 51(9): 1065-1072.
- [15] 陈多福, 黄永祥, 冯东, 等. 南海北部冷泉碳酸岩和石化微生物细菌及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(3): 185-189.
- [16] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: How much is really out there?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66(3-4): 183-197.
- [17] 莫杰, 高平. 海洋油气勘查现代技术方法综合应用现状及发展趋势(上)[J]. 中国海上油气, 2002, 16(2): 137-140.

Oil and gas geochemical exploration in the northern South China Sea——A case study of methane concentration

WANG Qing-guang^{1,2,3}, XU Rui-song¹, WANG Jie⁴, CHEN Yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Water Resources Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China; 4. Institute of Estuarine and Coast, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Received: May, 12, 2009

Key words: gas exploration; methane; hydrocarbon seepage

Abstract: We measured the concentrations of methane in seawaters at different sampling points in the northern South China Sea, and found that there were seven locations with unusually high concentrations of methane. Some of these locations had proved to be the sites of reservoirs, indicating information of seawater methane concentration may provide important guidance for future marine oil and gas exploration.

(本文编辑: 刘珊珊)