

南海琼东南盆地—西沙海槽天然气水合物地球化学勘探与资源远景评价

蒲燕萍, 孙春岩, 陈世成, 罗 伟, 孙 艳, 张海东

PU Yan-ping, SUN Chun-yan, CHEN Shi-cheng, LUO wei, SUN yan, ZHANG Hai-dong

中国地质大学工程技术学院, 北京 100083

School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:研究工区范围为南海琼东南盆地至西沙海槽一线的海域。数据来自:中国地质大学参加了 2000 年和 2006 年在中国南海西沙海槽工区天然气水合物地球化学勘探,通过现场快速勘查实测和室内分析测试得到的多种烃类数据;申请到大洋钻探 3 个航次典型钻井的样品,经国内实验室实测得到的酸解烃指标和酸解烃微量甲烷碳同位素数据;搜集的其他文献涉及研究区的酸解烃指标数据和酸解烃微量甲烷碳同位素数据。依据甲烷的地球化学特征、湿度比值分布和甲烷碳同位素的组成特征对研究区天然气水合物的成因进行了分析研究;依据数据对比探讨了酸解烃微量甲烷同位素值的地球化学意义,对中国海区天然气水合物的成因进行了讨论判别。最后,依据上述结论对区内天然气水合物资源的远景进行了评价和预测。

关键词:西沙海槽;琼东南;天然气水合物;酸解烃甲烷同位素;地球化学特征

中图分类号:P618.13;P632

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2009)11-1656-06

Pu Y P, Sun C Y, Chen S C, Luo W, Sun Y, Zhang H D. Geochemical prospecting of natural gas hydrate and resource evaluation in Qiongdongnan basin-Xisha trough of South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11):1656-1661

Abstract: Main working area of this paper is part of ocean from Qiongdongnan Basin to Xisha Trough in South China Sea. The data in this paper consisted: the data collected in the marine science investigation about gas hydrate in Qiongdongnan Basin and Xisha Trough from 2000 to 2006; the data from tested samples applied from ODP164, ODP204 and ODP308 where had found gas hydrate, which were tested for hydrocarbon compositions and acidolysis hydrocarbon isotopic compositions in laboratory; the data gathered from others papers. On the basis of analysis of distribution characteristics of methane, $C_1/(C_2+C_3)$ and characteristics of hydrocarbon isotopic compositions, we analyzed the cause of gas hydrate and the geochemical significance of acidolysis hydrocarbon isotopic compositions. Combined geochemical data with geological data, the best block for gas hydrate bearing was selected and the occurrence of gas hydrate in the working area was prospected.

Key words: Xisha trough; Qiongdongnan basin; gas hydrate; acidolysis hydrocarbon isotopic compositions; geochemical characteristics

天然气水合物是由水分子和碳氢气体分子组成的具有笼状结构的似冰雪状晶质化合物,因其气体分子以甲烷为主(>90%),故也被称为甲烷水合物或“可燃冰”。由于天然气水合物是一种储量巨大、洁净的新型替代能源,因而受到普遍关注^[1-3]。目前,世界

上直接或间接发现的天然气水合物赋存区有 100 处以上(包括中国 2007 年在南海神弧发现的天然气水合物),海洋的天然气水合物占 90%左右。因此,国内外海洋天然气水合物的勘查成果和技术状况备受人们的关注。

收稿日期:2009-09-14;修订日期:2009-10-27

科技项目:国家“863”计划项目《海洋天然气水合物流体地球化学现场探测技术》(编号:2006AA09204)和《天然气水合物原位探测技术》(编号:2006AA09205)资助

作者简介:蒲燕萍(1983-),女,在读硕士,地质工程专业,研究方向为多元勘查技术方法及应用。E-mail:pyp2008@126.com

烃类地球化学勘查,是依据烃类微渗漏和垂直运移的理论,通过发现陆上和海底沉积物(或钻井水)的烃类指标异常,来寻找烃类资源的一种直接勘探的方法。陆区和海区石油、天然气资源勘查的成功实例已证明了这种方法的有效性。

天然气水合物与石油、天然气在组分上基本类似,主要区别在于,前者的烃类组分以甲烷为主,且成藏条件、机理不同,即水合物以固体形式赋存在孔隙沉积介质中,而油气则以流体形式赋存。尽管如此,理论研究和海上研究区的工作实践已表明,用于油气勘探的普适性化探方法技术,如土壤(岩石)烃类测量法、同位素地球化学方法,同样适用于天然气水合物勘查。在水合物勘查中,除用一定的地球化学手段获取有关介质中的天然气水合物的信息以外,在研究工作中,主要强调检测与水合物有关的烃类异常和成因指标,以期根据海底沉积物痕量化学组分的分布追踪和发现水合物存在的有利

证据。地球化学特征研究是天然气水合物勘查和研究的重要环节。

本次研究以南海琼东南盆地至西沙海槽一线海域的调查资料为基础,依据甲烷的地球化学特征、干燥系数的分布特征和甲烷碳同位素的组成特征,对研究区天然气水合物的成因进行了分析;根据搜集的相同或类似样品的常规甲烷碳同位素值和酸解烃甲烷碳同位素值的差异,探讨了酸解烃甲烷碳同位素对中国海区天然气水合物成因判别的地球化学意义;最后,依据上述结论对工区内天然气水合物资源的远景进行了评价。

1 工区地理位置和地质概况

研究工区位于海南岛东南海域,西邻莺歌海走滑盆地,南与中建南盆地相接(图 1)。工作区主要包括琼东南盆地西南及西沙海槽盆地西南 2 部分。

工区内已完成 4 条测线的地震勘探工作,进行

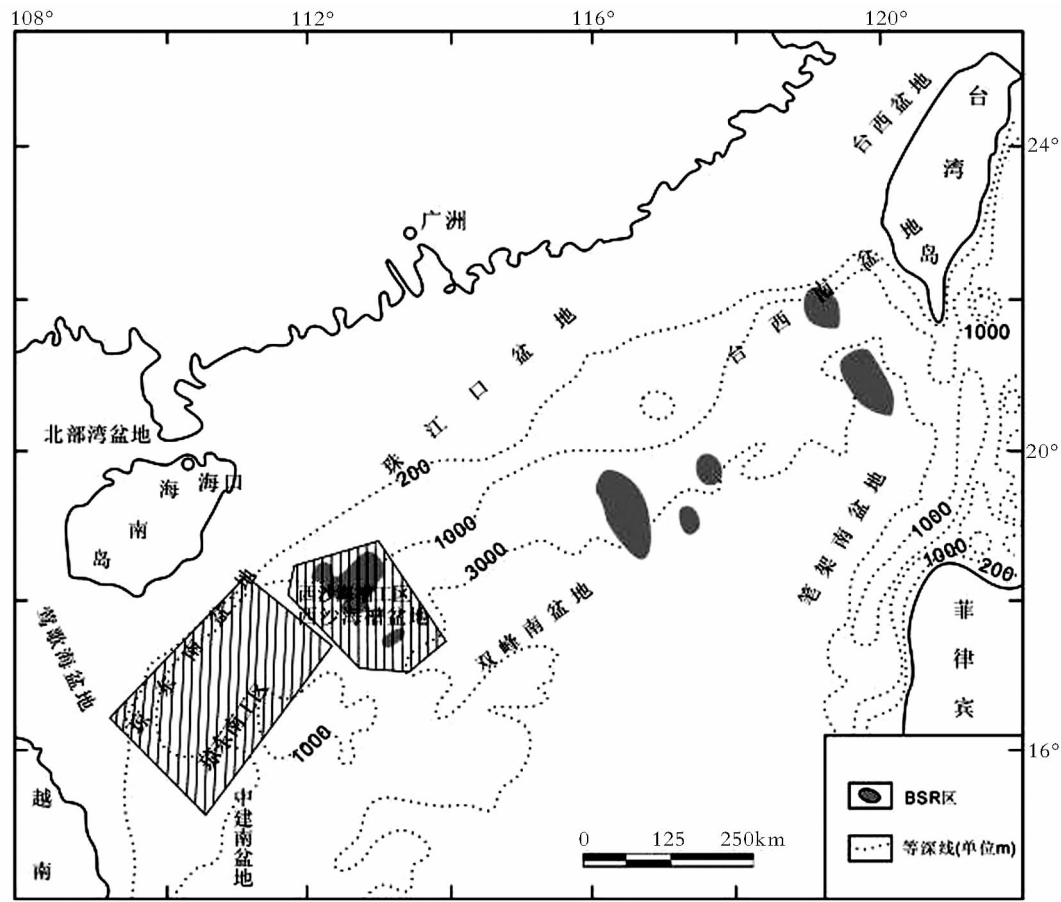


图 1 工区地理位置
Fig. 1 Geographical position of study area

了地震数据的保幅和 AVO、叠前弹性参数反演等工作。2000 年以来,广州海洋地质调查局在此区域完成了 3 个航次的地球化学勘探工作。

琼东南盆地位于南海北部陆缘海南岛的东南部,东经 108~111°、北纬 15~19°处。盆地呈北东向伸展,由陆架浅水区、中央裂陷带和西南部陆坡深水区组成,属陆缘裂谷新生代张裂型盆地。盆地内新生代沉积地层最大厚度约 12km^[4],第四系和新近系上新统海相泥岩具有生物气形成的条件,第三系煤系地层普遍处于异常高压和高温条件,具有形成热解成因天然气的地质条件,生物成因和热成因天然气资源量巨大。盆地总面积约 4.5×10⁴km²,新生代地层厚 3000~10000m,是南海北部的大型含油气盆地之一,也是中国深海找油气、找水合物的有利地区。

琼东南盆地内断裂构造非常发育,在盆地陆架和陆坡区已鉴别出北东向的断裂构造带。部分地震剖面显示断裂带可延伸至海底附近,与泥底辟相连^[5]。盆地沉积层内发育的高压泥底辟和气烟囱,以及将它们连通至海底的断裂,为烃类气体的运移提供了通道。

琼东南盆地西南部陆坡深水区的华光凹陷,基底埋深的总体趋势是向南加大,但以中央裂陷带为最深。新生代沉积厚度表现出类似的变化趋势,浅水区的古近系厚 4500m 左右,深水区则厚达 8000m,表明深水区沉降速率远大于浅水区。新近纪以来,陆坡深水区沉积接近 10000m,而陆架浅水区仅 2000~3000m,反映新近纪以来深水区区域性沉降大于浅水区。这预示着琼东南盆地陆坡深水区的油气资源潜力要优于陆架浅水区^[6]。

同处于研究区内的西沙海槽属新生代沉积盆地。该盆地基本为半地堑型盆地,深部沉积了较厚的浅海相、海陆交互相碎屑沉积,快速埋藏了新生代的大量有机质,具有较好的石油和能源气藏的发育条件,能够为形成天然气水合物提供充足的物质来源。

总体说来,研究区的水合物物质来源发育,地质构造条件及断层性质有利于形成流体运移,拥有水合物赋存的浅部稳定环境和温压条件,具备水合物成藏的地质条件。在大的区域上,该地区应该为南海具有天然气水合物赋存前景的地区之一^[1,4]。

2 工区内地球化学数据及来源

本文研究区的范围为南海琼东南盆地至西沙海

槽一线海域。本文的数据主要来自:①1999—2006 年期间,于琼东南海区 93 个站位采集了 204 个海底浅表层沉积物样品,全部测试了烃类组分,其中 12 个测试了甲烷碳同位素;在西沙海槽 115 个站位采集了 179 个海底沉积物样品,均测试了烃类组分,对 8 个样品测试了甲烷碳同位素。总计烃类指标浓度测试样品 383 个,高异常点上的酸解烃微量甲烷碳同位素测试样 20 个。②申请到大洋钻探 ODP164、ODP204、ODP308 航次中见到水合物典型钻井不同段位的 174 个土壤样品,经国内实验室测定得到酸解烃类指标浓度和高值点上测得的 130 个酸解烃微量甲烷碳同位素数据。③从其他文献中搜集的涉及南海海区的 385 个烃类指标数据和 123 个酸解烃微量甲烷碳同位素数据。

海底沉积物样品室内分析测试工作由中国石化无锡石油地质研究所完成,采用酸解烃分析方法。甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分析采用 Finnigan MAT 251 同位素质谱仪。具体数据如表 1 所示。

3 地球化学特征分析

3.1 甲烷地球化学分布特征

工区内海底沉积物的分析结果见表 1。采用数据统计方法,383 件自采的南海浅表(1.3~1.5m)沉积物样品的甲烷浓度范围为 6.6~912.9 $\mu\text{L}/\text{kg}$,均值 131.3 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 。其中,琼东南工区浅表沉积物甲烷均值为 112.8 $\mu\text{L}/\text{kg}$,湿度比值域为 6.3~90.0,均值 26.9;西沙海槽浅表沉积物甲烷均值为 264.1 $\mu\text{L}/\text{kg}$,湿度比值域为 0.4~70.7,均值 22.7。由上可见,琼东南盆地与西沙海槽的烃类地球化学特征是不同的,前者甲烷含量低,湿度比值偏高。琼东南盆地的烃类浓度具有深部热解气的特征,部分点位湿度比值达到 90.0,显示具有产生生物气或二次生物气的可能。值得注意的是:琼东南盆地酸解烃甲烷指标的标准差比西沙海槽高^[1],说明琼东南盆地主要烃类指标的波动幅度较大,烃气运移可能较多受到构造的控制,易于在有利部位形成高值局部异常。

从其他文献搜集到的南海北部海底沉积物样品的酸解烃数据 385 个,甲烷浓度范围为 10.7~781.3 $\mu\text{L}/\text{kg}$,均值 172.5 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 。其中,台西南盆地的甲烷均值最大,为 319.6 $\mu\text{L}/\text{kg}$ ^[7],湿度比值的值域为 3.0~45.0;西沙海槽的甲烷均值最小,为 69.5 $\mu\text{L}/\text{kg}$ ^[7],湿度比值的值域为 18.0~30.0。以上数据显示,文献中

表 1 工区、ODP 及南海其他地区酸解烃数据

Table 1 Acidolysis hydrocarbon data of work area, ODP and other areas of South China Sea

采样 地区	样品 类型	样品 个数	CH ₄ /μL·kg ⁻¹		湿 度 比 值		样品 个数	δ ¹³ C ₁ /‰PDB		数据 来源
			含量	均值	数值范围	均值		数值范围	均值	
琼东南	浅表	204	6.6~417.0	112.8	6.3~90.0	26.9	12	-33.6~-29.9	-31.9	实测
西沙海槽	浅表	179	8.4~912.9	264.1	0.4~70.7	22.7	8	-51.0~-34.2	-41.3	实测
ODP164	深部	67	20.0~3478.0	659.0	4.8~36.2	13.4	67	-66.0~-28.5	-47.3	实测
ODP204	深部	47	52.5~1019.7	545.8	18.7~136.7	69.3	3	-56.0~-48.4	-53.4	实测
ODP308	深部	60	344.0~2684.0	1006	5.5~9.6	7.0	60	-46.4~-38.8	-42.2	实测
ODP1143	深部	31	32.1~610.2	209.4	2.0~13.0	—	8	-34.3~-30.7	-32.7	[7]
ODP1146	深部	47	15.7~394.1	133.4	2.0~18.0	—	16	-36.2~-29.8	-33.7	[7]
台西南	浅表	113	51.2~781.3	319.6	3.0~45.0	—	62	-46.1~-33.6	-36.6	[7]
西沙海槽北	浅表	18	83.7~247.9	141.7	1.0~24.0	—	8	-37.1~-25.2	-33.4	[8]
西沙海槽	浅表	127	10.7~243.5	69.5	18.0~30.0	—	8	-43.8~-26.6	-34.5	[7]
珠江口外	浅表	12	27.8~270.8	159.9	8.9~22.2	13.4	7	-44.3~-29.8	-35.0	[9]
北部陆坡	浅表	20	71.0~242.0	147.9	4.5~13.7	8.8	10	-44.6~-34.2	-36.6	[10]
西部陆坡	浅表	4	73.0~96.0	88.3	6.8~13.5	10.5	1	-48.9	-48.9	[10]
中央海盆	浅表	13	20.0~119.0	70.6	6.4~190.7	37.0	3	-35.8~-24.4	-31.8	[10]

的西沙海槽数据与笔者实测的数据相差比较大,湿度比值差别也比较大,可能代表的不是一类样品。但根据笔者的实测数据和其他地球物理资料的解释结果,认为西沙海槽是具有水合物资源远景的。

174 件 ODP 不同井段样品的酸解烃甲烷浓度范围为 20.0~3478.0μL/kg, 平均值为 748.0μL/kg。ODP164、ODP204、ODP308 三个航次样品的甲烷均值大大高于南海海区的甲烷均值(图 2)。这几个井位都是天然气水合物直接产出点,与海底沉积物中酸解烃的含量不可直接相比较。由表 1 的干燥系数

特征可见,ODP164、ODP204 航次同属一类,ODP308 和 ODP1143、1146 航次则另属一类。ODP 308 航次所处地理位置的丰富热解气导致上部甲烷的大量富集,提供了形成天然气水合物的丰富物质来源。这个实例给琼东南盆地天然气水合物资源的勘查带来了启示。

3.2 甲烷碳同位素组成及气体成因

在琼东南盆地和西沙海槽采集到的海底沉积物样品中,对 20 个样品进行了酸解烃微量甲烷碳同位素测定,搜集到了南海 123 个样品的酸解烃微量甲

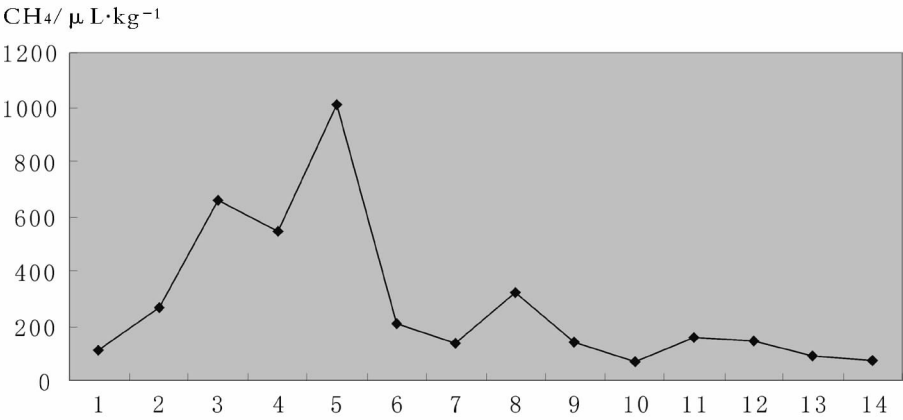


图 2 甲烷含量均值图

Fig. 2 Average value of methane

1—琼东南;2—西沙海槽;3—ODP164;4—ODP204;5—ODP308;6—ODP1143;7—ODP1146;8—台西南;9—西沙海槽北;10—西沙海槽;11—珠江口外;12—北部陆坡;13—西部陆坡;14—中央海盆。其中 6~14 的数据依据的文献见表 1

表 2 ODP164 航次水合物赋存区岩心样品
酸解烃碳同位素值修正示意表^[11]

Table 2 Amendment of acidolysis hydrocarbon
isotopic compositions of ODP164

样品号	$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$		$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$		$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$
A8-4	-57.41		-62.41		-67.41
A9-2	-50.56		-55.56		-60.56
B1-4	-51.44		-57.44		-62.44
C1-1	-57.08		-62.08		-67.08
D5-C	-66.00	————→	-71.00	————→	-76.00
D6-1	-59.31	加上-5‰	-64.39	加上-5‰	-69.31
D6-5	-59.39		-64.39		-69.39
D6-7	-57.28		-62.28		-67.28
E4-4	-48.08		-53.08		-58.08
E6-5	-46.66		-51.66		-56.66
E7-5	-54.51		-59.51		-64.51

烷碳同位素的数据,共计 143 个样品的数据。针对申请到的 ODP164、204、308 航次中见到水合物的不同典型井段样品,共测得 130 个酸解烃微量甲烷碳同位素数据。

经统计,143 个南海酸解烃微量甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值域为 $-51.0\text{‰} \sim -24.4\text{‰}$, 均值 -35.5‰ ; ODP164、204、308 三个航次 130 个酸解烃微量甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值域为 $-66\text{‰} \sim -28.5\text{‰}$, 均值 -45.1‰ 。其中,琼东南盆地 12 个酸解烃微量甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-33.7\text{‰} \sim -29.9\text{‰}$, 均值 -31.9‰ ; 西沙海槽 8 个酸解烃微量甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-51.0\text{‰} \sim -34.2\text{‰}$, 均值 -41.3‰ 。

在国际上,有关天然气水合物成因研究的文献一般多采用据天然气测得的常规微量甲烷碳同位素值,有关其他区域的文章中经常引用的 Bernard、Matsumotod 等人的数据和南海前期工作中由德国人 Berner 等提供的测试结果,均为上述性质的数据。本文研究所依据的同位素数据全部为酸解烃微量甲烷碳同位素数据,与 Bernard、Matsumotod 等人的数据标准相比,肯定会有一定的差异。

国内学者阮天健等^[11]曾作过测定,新疆沙参 2 井天然气样品的甲烷碳同位素值为 -40.6‰ ,地表土壤酸解烃甲烷碳同位素值为 $-38.0\text{‰} \sim -35.0\text{‰}$,地表样品酸解烃甲烷碳同位素值偏正约 5 ‰。据此,笔者对实测的 ODP164 航次水合物赋存区钻井岩心

样品酸解烃微量甲烷碳同位素值做了修正,结果如表 2 所示,将水合物赋存区或其邻近区实测的酸解烃微量甲烷碳同位素值加上 -5‰ ,变换后的数值基本小于 -55‰ ,符合水合物生物成因的标准。通过查阅资料可知,布莱克海台赋存的是典型的生物成因气,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-63\text{‰} \sim -96\text{‰}$ 。由表 2 可以看出,笔者所采集的原始岩心样品的酸解烃甲烷碳同位素值,加上 -10‰ 的修正后,基本可以符合布莱克海台 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值的范围。因此笔者认为,在使用酸解烃甲烷碳同位素进行天然气水合物成因判别时,有必要在一定条件下进行 $-10\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 的修正。具体的量值关系有待进一步研究^[12]。

综上所述,在对酸解烃脱气作用引起的同位素数值偏畸作 $-10\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 的修正后,琼东南的酸解烃甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 落在 $-43.7\text{‰} \sim -39.9\text{‰}$ 的范围之内,属热解成因气;西沙海槽酸解烃甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 落在 $-61.0\text{‰} \sim -44.2\text{‰}$ 范围之内,属部分生物成因、部分热解成因的混合气。琼东南盆地与西沙海槽二者的烃类气体虽然同为热解成因,但前者酸解烃甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于 $-33.7\text{‰} \sim -29.9\text{‰}$ 之间,具有过成熟气或煤成气的特征^[1]。

4 结 论

(1)琼东南盆地浅表层沉积物分析结果为:酸解烃甲烷含量浓度范围为 $6.6 \sim 417.0 \mu\text{L/kg}$, 均值

112.8 $\mu\text{L/kg}$;湿度比值的值域为6.3~90.0,均值26.9;经修正甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 的范围为-43.7‰~-39.9‰。表明琼东南盆地烃类气体属于热解成因气,可能混有过成熟气或煤成气^[1]。

(2)西沙海槽浅表层沉积物分析结果为:酸解烃甲烷含量浓度范围为8.4~912.9 $\mu\text{L/kg}$,均值264.1 $\mu\text{L/kg}$;湿度比值的值域为0.4~70.7,均值22.7;经修正甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 的范围为-61.0~-44.2‰。属部分生物成因、部分热解成因的混合气。

(3)和常规甲烷碳同位素值相比,酸解烃甲烷碳同位素结果偏正10‰~5‰,通过修正,能够作为天然气水合物气体成因的判断依据。通过酸解烃法获取甲烷碳同位素数据来研究水合物气体的成因,对水合物勘探有重要意义。

(4)地球化学、地球物理特征表明,大陆边缘陆坡和以断裂为主的多种构造形迹的控制作用,能够为水合物的气源运移、最终形成和储藏提供优越条件。综合分析本文展现的南海烃类地球化学数据,并结合以往的地质、地球物理研究结果^[3],笔者认为:琼东南盆地至西沙海槽一线海域是南海中值得关注的天然气水合物生储的优势区域,有良好的天然气水合物赋存远景。

致谢:感谢国土资源部广州海洋地质调查局有关领导和“海洋四号”大洋科学调查船全体工作人员的支持和帮助。

参考文献

- [1]孙春岩,吴能友,牛滨华,等.南海琼东南盆地气态烃地球化学特征及天然气水合物资源远景预测[J].现代地质,2007,21(1):95-100.
- [2]孙春岩,王宏语,牛滨华.西沙海槽天然气水合物地球化学勘探[J].地球科学,2004,29(2):135-140.
- [3]孙春岩,牛滨华,文鹏飞,等.海上E区天然气水合物地质、地震、地球化学特征综合研究与成藏远景预测[J].地球物理学报,2004,47(6):1076-1085.
- [4]祝有海,吴必豪,卢振权.中国近海天然气水合物找矿前景[J].矿床地质,2001,22(5):6-10.
- [5]陈多福,李绪宣,夏斌.南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测[J].地球物理学报,2004,47(3):483-489.
- [6]何家雄,刘海岭,姚永坚,等.南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M].北京:石油工业出版社,2008:19-22.
- [7]祝有海,吴必豪,罗续荣,等.南海沉积物中烃类气体(酸解烃)特征及其成因与来源[J].现代地质,2008,22(3):407-414.
- [8]Berner U, Faber E. Hydrocarbon gases in surface sediments of the South China Sea[M]//Jin X, Kudrass H R, Pautot G. Marine Geology and Geophysics of the South China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1992:199-211.
- [9]郑建禄,张穗,周明杰,等.南海北部海域表层沉积物中吸附气态烃的特征[J].热带海洋,1994,13(2):93-98.
- [10]林卫东,沈平,徐永昌,等.南海中部近代沉积物中烃类气体的地球化学特征及其来源[J].沉积学报,2005,23(1):170-174.
- [11]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,1992:126-129.
- [12]孙艳.南海天然气水合物地球化学勘探及西沙海槽-琼东南盆地远景预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2007.