

南海的天然气水合物矿藏

姚伯初

(国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:讨论了南海的地形地貌特征,以及中新世代的构造运动历程;认识到中中新世之前,这里经历了一系列构造运动,但在中中新世之后,这里无构造运动,只是发生了区域沉降。由此认为南海应有丰富的天然气水合物矿藏,进而估算了南海天然气水合物的总资源量达643.5亿—772.2亿t油当量。

关键词:地形地貌;构造运动;天然气水合物;资源量;南海

中图分类号:P744.4

文献标识码:A

自从1810年Davy在实验室中首次合成氯气水合物后,科学家迄今已经对水合物进行了近两个世纪的调查和研究。特别是60年代以来,在两极地区和大陆边缘地区勘探石油和实施深海钻探计划(DSDP和ODP),发现上述地区的大部分地带均存在天然气水合物矿藏;同时,也发现地球气圈外的环境中也存在天然气水合物^[1-5]。至今已在各大洋和边缘海的大陆边缘及内陆湖泊中发现了32处存在天然气水合物,在两极地区发现8处存在天然气水合物矿藏^[6-15]。

从地质条件看,全球各大洋的陆缘上,无论是活动边缘,还是被动边缘,或是转换边缘,都可能存在天然气水合物矿藏。这是因为这些地区大都满足天然气水合物形成的4个条件:一是沉积物中有足够的气体分子存在;二是有足够的水分子以形成水合物的腔洞;三是温度处于水合物的稳定区间内;四是压力处于水合物的稳定区间中。本文根据南海的地形地貌特征、区域地质条件分析天然气水合物存在的证据,并估算天然气水合物的资源量。

1 南海的地形地貌特征

南海是西太平洋最大的边缘海之一,面积约350万平方千米^[16-18],为一菱形海盆,平均水深1000m以上。

南海北部陆架呈北东走向,海底自西北向东南缓倾,沿岸岛屿密布,珠江河口为深入内陆的三角型海湾。珠江口以东的陆架宽度大于200km;珠江口以西的陆架宽度小于200km。南海南部陆架宽度在300km以上。陆架地形复杂,等深线呈不规则弯曲,岛屿、浅滩和沟谷甚多。南海西部陆架沿中南半岛东岸呈条带状分布,宽40—70km。南海东部岛架狭窄,宽50—100km,坡度较大(图1)。

收稿日期:2000-01-04;修订日期:2000-06-05

基金项目:国家重点基础研究项目(G2000046705)资助

作者简介:姚伯初(1940—),男,湖北蒲水人,教授级高工,主要从事海洋地球物理和海洋地质构造研究。



图1 南海地貌图

图中的圆黑点表示该处海底表层沉积的地震层速度大于 $2\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,
预示该处地层中可能存在天然气水合物。黑粗线表示文中地震剖面的位置

Fig. 1 The geomorphology of the South China Sea

南海北部陆坡的水深为 200—3 400m, 陆隆区水深为 3 400—4 200m。陆坡东窄西宽。陆坡大约以 1 100m 水深为界, 其上部地形较平缓, 而陆坡下部地形特别陡峭, 坡度为 50×10^{-3} 。陆坡上分布着一系列海山、海丘和海谷。海山和海丘主要分布在东沙群岛东至东南部, 山体为长条形。著名的海山有北坡海山、尖峰海山和笔架海山, 相对高差在 1 000m 以上。这里有东沙东海谷和珠江海谷。东沙东海谷全长 315km, 海谷上部切割深度大, 有的地方深切至 1 200m, 谷底坡度达 162×10^{-3} ; 海谷下部切割深度为 300m 左右, 谷底坡度达 20×10^{-3} 。珠江海谷全长 346km, 海谷上部切割深度为 440m, 谷底坡度达

16×10^{-3} 。中部切割深度为 530m, 谷底坡度达 18×10^{-3} 。下部切割深度为 770m, 谷底坡度达 19×10^{-3} 。

南海西部陆坡近南北向延伸, 从北向南宽度变窄, 坡度变陡。北部宽度超过 486km, 而南部约 200km。从总体看, 本区水深小于 1 500—2 000m 的海地区海底地形平缓, 而水深大于 1 500—2 000m 的海区为一北东向沿伸的陡坡带, 群峰突起, 沟谷相间, 地形极为复杂。这里分布着西沙海底高原和西沙群岛、中沙海底高原和中沙群岛、西沙海槽和中沙海槽, 以及北东向的海山和海谷带。西沙海底高原水深在 900—1 100m, 呈东西向分布, 长 170km。西沙群岛除高尖石岛外, 其余是由 30 余座珊瑚礁构成的低矮的礁岛和暗礁。中沙海底高原北东向长约 120km。水深大于 200m 处为高原斜坡, 坡度为 35×10^{-3} — 105×10^{-3} , 其东南坡度达 $1\,235 \times 10^{-3}$, 中沙群岛是分布于中沙海底高原上的一群沙洲、浅滩和暗礁, 大都位于水下 20m 处。西沙海槽为一东西向的弓形海槽, 长约 420km。槽底自西向东缓倾, 平均坡度 3×10^{-3} 。槽底比周围海底低 400—700m, 中沙海槽呈北东向展布, 长约 300km。槽底宽 10—80km, 低于周围海底 400—500m。海槽地形复杂, 底部自中部向西北和西南倾斜。

南海南部陆坡宽度达 400km。海底切割强烈, 地形崎岖不平。这里分布着南沙海底高原和南沙群岛、南沙海槽和多条裂谷。南沙海底高原水深为 1 400—2 000m, 与深海平原相对高差达 2 300m。高原海底地形复杂, 切割强烈, 礁滩密布, 沟谷纵横。南沙群岛位于南沙海底高原上, 由众多岛屿、沙洲、暗滩、暗礁和暗沙组成。南沙海槽位于南沙海底高原和巴拉望岛之间, 为北东向海槽, 长 500km, 宽 70km。槽底水深 2 800—2 900m, 低于周围海底 800—1 000m。海槽两边坡度较陡, 槽底平坦, 发育有小型海丘和海洼, 海洼水深大于 3 000m, 低于槽底 300 余米。南海南部海底沟谷甚多, 海谷一般低于高原 300—500m, 大多分布于群岛和群礁之间。

南海东部岛坡地形狭窄而陡峭, 最大宽度不超过 150km, 平均坡度 30×10^{-3} 。在吕宋海槽和马尼拉海沟之间, 岛坡坡度达 109×10^{-3} — 164×10^{-3} ; 南部沙巴一带坡度 27×10^{-3} 。东部岛坡上发育有北吕宋海槽和西吕宋海槽, 以及海山和海丘。北吕宋海槽呈南北走向, 长 240km。槽底水深 2 900—3 400m, 平均坡度 2×10^{-3} , 比周围海底深约 500m。西吕宋海槽近南北走向, 长约 210km, 槽底低于周围海底 400—600m, 南宽北窄。北部槽底水深 2 400—2 500m, 宽 30km; 南部水深 2 400—2 600m, 槽底宽阔, 槽坡陡峭, 地形复杂。自台湾南端至吕宋岛, 发育两列南北连绵的海山, 或称海脊。

南海深海平原呈北东向分布, 长 1 500km, 最宽处达 810km。深海平原和陆坡与岛坡的转折点明显, 海底由北向南微倾, 水深由 3 400m 增至 4 300m, 平均坡度为 1.0×10^{-3} — 1.3×10^{-3} 。其上分布着一系列海山和海丘。在西北海盆中分布着北东走向的双峰海山, 山顶相对高差达 1 100m。在中央海盆中分布下列东西向海山: 玳瑁海山、宪北海山、石星海山、宪南海山、涨中海山、黄岩海山、珍珠海山在西南海盆和中央海盆的交界处, 分布着南北走向的中南海山, 它长 100km, 宽 40km, 山顶水深 273m, 相对高差达 4 000m。在西南海盆, 分布着一系列北东走向的海山和海丘。中部长龙海山长 240km, 宽 10km, 相对高差为 200—3 100m。在西南部有数个海洼, 水深大于 4 400m, 其中一个长 90km, 宽 30km。

2 区域地质构造特征

作为西太平洋最大的边缘海之一的南海,在中新生代经历过独具特色的构造运动历程,在中生代早期(三叠纪),印支地块与华南地块沿红河断裂带缝合^[19],构成古南海的西部和北部边缘。西沙—中沙地块是印支地块的一部分,此时它沿西沙海槽断裂带与华南地块发生碰撞、缝合。南部的西北婆罗洲地块以与印支地块相连。因此,当时古南海为一海湾,东部与古太平洋相连。在这个海湾中,有一个较大的岛屿,就是南沙—礼乐地块^[20]。侏罗纪时,古太平洋板块向西北方向运动,俯冲于亚洲大陆边缘之下。古南海洋壳亦跟随古太平洋板块向华南陆缘俯冲。俯冲带分布在今日台湾浅滩、东沙群岛、中沙群岛、万安滩一线的东南边缘。南沙—礼乐地块也随着古南海向西北方向运动,在早白垩纪末,南沙—礼乐地块和华南地块发生碰撞并缝合在一起,燕山运动便结束了。中生代末至新生代早期,华南陆缘发生了一次张性构造运动,即神狐运动,陆缘上发生了一系列北东向正断层,以及相应的地堑半地堑。此后这些地堑和半地堑逐渐沉积了陆相沉积,后来发育为盆地的烃源岩。晚始新世时,印度板块与欧亚板块发生了碰撞,在南海地区引起了第二次构造运动,即南海运动。南沙—礼乐地块沿中南—礼乐断裂发生破裂,南沙地块与华南地块沿中沙—万安滩一线的东南边缘发生分离,其间发生海底扩张。到早渐新世时,南沙地块和西北婆罗洲地块沿卢帕尔断裂碰撞和缝合^[21-22],海底扩张停止,南海西北海盆和西南海盆诞生。晚渐新世时,礼乐地块沿原缝合线和华南地块发生破裂和分离,并向南运动,其后发生海底扩张。早中新世时,礼乐地块和婆罗洲地块在南沙海槽发生碰撞,海底扩张停止,南海中央海盆诞生。在中中新世末,从印—澳板块分离出来的苏拉威西地块和婆罗洲地块发生碰撞,引起南海地区普遍抬升。这次构造事件在南海北部称为东沙运动,南部称为万安运动。此后再无发生构造运动,全区一直发生热沉降,直至今日(图2)。

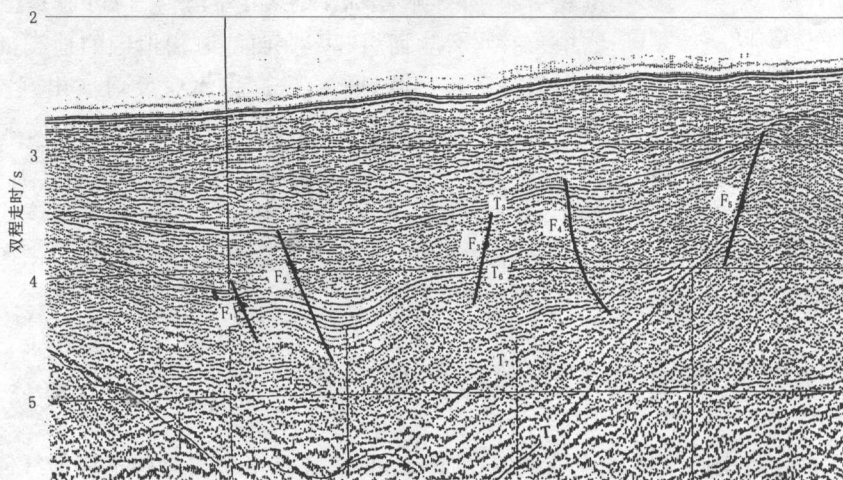


图2 西沙海槽处的地震反射剖面

图中的 T_2 表示新生代沉积基底, T_3 代表中中新世末的沉积界面, F 为断裂。剖面位置见图1中A

Fig. 2 The seismic profile in the Xisha Trough area

由上述分析可见,南海地区的构造面貌是在中中新世末(约 11Ma B. P.)形成的,在此之后全区接受了一套近水平的沉积。从图 2 看出, T_3 (中中新世末)以下的沉积中发育有许多断层,这些断层有利于流体的运动。这种构造环境非常有利于天然气水合物的形成。因此,我们认为南海地区应有丰富的天然气水合物矿产资源。

3 南海天然气水合物存在的证据

作者已对南海北部陆缘的天然气水合物矿藏进行过研究^[23]。从我们过去所做的常规地震剖面上,已在三处发现存在似海底反射波(Bottom Simulate Reflection, 简称

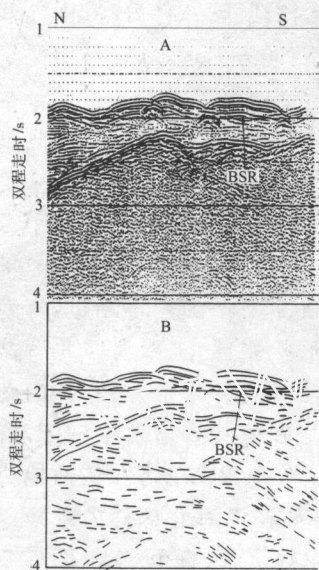


图3 西沙群岛南部的地震剖面

A. 地震剖面; B. 解释剖面

Fig. 3 The seismic profile in southern of Xisha Islands

BSR), 其中一处在西沙群岛南部(图 3, 图 1 中 A 为该剖面的位置)。这里水深 1 350—1 425m。在海底之下 0.25 秒(双程走时)处有一反射波,与海底平行,但和地层反射波斜交,这就是似海底反射波。据计算,这里 BSR 处静水压力为 $(163.9 \times 10^5 \text{ Pa}) \cdot \text{cm}^{-2}$ 。如果海底温度在 0°C 附近,那么,BSR 处只有 $6-7^\circ\text{C}$,故该处应处于水合物的稳定区带之内。另外,作者还在西沙海槽、东沙群岛东南部的地震剖面上发现了似海底反射波。同时,作者利用过去在北部陆缘做的 165 个地震声呐浮标站的数据,考虑海底第一层沉积的层速度,发现有 9 处的层速度大于或等于 $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。正常情况下,海底第一层沉积的地震波层速度在 $1.6-1.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,而这里 9 处第一层沉积的层速度达 $1.95-2.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,比正常沉积的层速度大 $0.2-0.64 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种高层速度除少数地区(陆隆地区)可能是由浊流沉积引起(如声呐浮标 229 站)外,其它均可能是由于沉积物中含有水合物而引起。在西沙海槽地区的地震剖面上也存在似海底反射波(图 4)。这里海底反射波出现在 2.42s (双程走时)处,海底之下的地层反射波与海底反射波有一夹角,但在 2.8s 处有一反射波,其形状与海底反射波相似,

且平行于海底反射波,并且与地层反射波相切,这就是似海底反射波,它表示该处海底之下的地层中可能存在天然气水合物矿藏。因此,作者认为南海陆坡和陆隆区存在天然气水合物矿藏的可能性很大,而且资源量非常丰富。

4 南海天然气水合物的资源量估算

天然气水合物中的气体主要是甲烷,理论上讲,天然气水合物分解生成的气体总量称做原始总资源量。Gornitz^[24]利用下式计算原始总资源量

$$V = A \Delta z \Phi H E \quad (1)$$

式中 V 为天然气水合物中的甲烷总量,即原始总资源量; A 为天然气水合物分布面

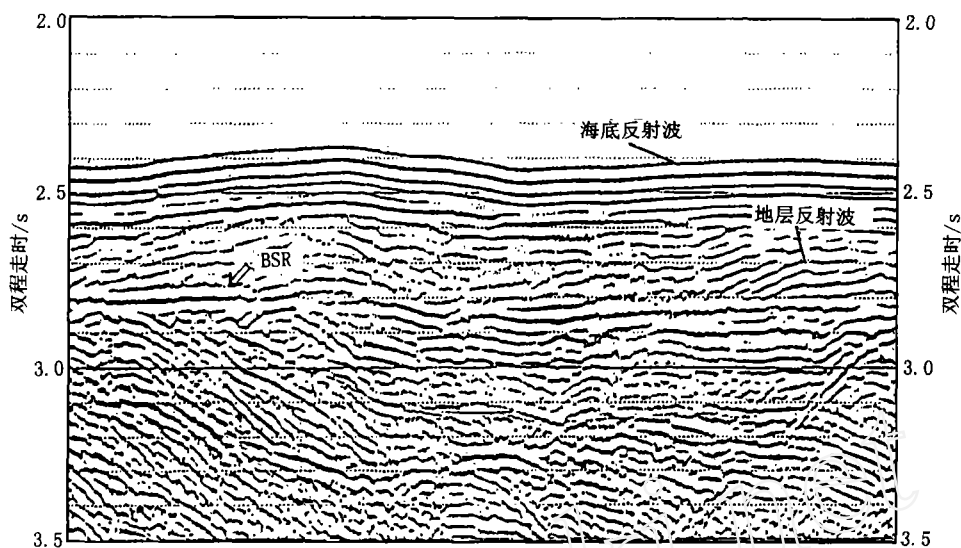


图4 西沙海槽的地震反射剖面

图中海底反射大约在2.4s处,在2.8s处有一反射波,它切割地层反射波,但与海底反射波平行,这就是似海底反射波(BSR),它表示这里海底之下的地层中可能存在天然气水合物。剖面位置见图1中C

Fig. 4 The seismic profile in the Xisha Trough area

积; Δz 为天然气水合物稳定带的平均厚度; Φ 是沉积物的平均孔隙率; H 为天然气水合物的充填率; E 为天然气水合物的容积倍率。

一般来讲,天然气水合物分布比较分散,只有一部分甲烷气体可以成藏,因此,天然气水合物的资源量是指能成藏的那部分天然气水合物所分解的甲烷总量,即将天然气水合物的原始总资源量乘以聚集率 R ,得到水合物资源量:

$$Q_s = VR = A \Delta z \Phi H E R \quad (2)$$

在天然气水合物稳定带之下的沉积中,气体是以游离气而存在的。Satoh^[25]用下式计算游离气的资源量:

$$Q_f = A_f \Delta Z_f \Phi P / P_0 (1 - W) T_0 / T \quad (3)$$

式中 Q_f 为游离气的资源量; A_f 为游离气的分布面积,一般与水合物分布面积相同; ΔZ_f 是含游离气沉积的平均厚度; Φ 为含游离气沉积的平均孔隙率,一般与含水合物沉积的孔隙率相同; P 为地层压力; P_0 为标准状态下的地层压力; T 为沉积的绝对温度; T_0 是标准状态下的沉积绝对温度; W 为水饱和度。

一般来讲,一个地区的天然气水合物的总资源量,等于天然气的资源量加上游离气的资源量,即:

$$S = Q_s + Q_f \quad (4)$$

由图1计算得出,南海地区可能分布天然气水合物矿藏的面积 $93 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据作者对南海北部陆缘地震资料的分析,发现这里有12处可能有天然气水合物存在。由这些资料统计,南海天然气水合物稳定带的平均厚度为482m。由俄罗斯梅索亚哈气田和阿拉斯加普鲁德霍气田的资料统计,天然气水合物之聚集率 R 为0.005。容积倍率取决于

甲烷分子在笼形结构中的占有率,100%占有率时 $E=172$,90%时 $E=155$ 。表层沉积物孔隙率一般为50%。天然气水合物的充填率取0.5。如果南海93万 km^2 地区都有天然气水合物分布,那么,天然气水合物的资源量为

$$Q_s = 93 \times 10^{10} \times 482 \times 0.5 \times 0.5 \times 155 \times 0.005 = 6.685 \times 10^{13} \text{ m}^3$$

对于游离气,其平均厚度一般取20m;聚集率取0.025;孔隙率取0.5; $P/P_0 = 300$; $T_0/T = 1$;水饱和率取 $W = 0.4$ 。因此,南海天然气水合物矿藏分布带之下的游离气的资源量为

$$Q_f = 93 \times 10^{10} \times 20 \times 0.5 \times 300 \times 1 \times (1-0.4) = 4.185 \times 10^{13} \text{ m}^3$$

由上述计算,南海天然气水合物矿藏的总资源量为

$$S = Q_s + Q_f = 1.287 \times 10^{14} \text{ m}^3 = 1.287 \times 10^{11} \text{ t 油当量} = 1287 \text{ 亿 t 油当量}。$$

实际上,不可能所有满足天然气水合物稳定条件的地区都有天然气水合物分布,如果南海满足天然气水合物稳定条件的海域中有50%—60%的地区分布有天然气水合物矿藏,则其总资源量有643.5亿—772.2亿t油当量。

5 讨 论

南海水深大于300—400m的陆坡和陆隆区域面积达93万 km^2 。该区地形复杂,海山、海丘、海槽、海谷、暗礁、暗滩密布,并发育一些海岛。中新生代这里经历过一系列构造运动,但在中中新世以来,这里构造运动很少,只是发生区域沉降,在稳定环境中沉积了一套近水平沉积。这一时期陆坡上的沉积速率较高,如东沙群岛东部的深海钻探1144井揭示,在最近一百万年中,沉积速率达 $(40-120) \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。沉积速率高可在沉积中积累大量有机物,为细菌将其降解成甲烷气提供物源。在这套近水平沉积之下的沉积中,由于先前的构造运动的影响,发育着一些断层。这些断层可达 T_3 以上的地层,有利于下面沉积中的流体沿断层进入中中新世以后的地层中。中中新世以后的沉积目前已处于天然气水合物的稳定带之中;除它们自生的气体可用于生成天然气水合物外,下部沉积生成的气体溶于水,并沿断层向上流入中中新世以后的地层中,为形成天然气水合物提供了物质补给。因此,作者认为南海陆坡和陆隆区应有丰富的天然气水合物矿藏。作者根据南海地区天然气水合物矿藏的资料,参考世界上有关水合物的一些参数,估算南海天然气水合物的总资源量达643.5亿—772.2亿t油当量,大约相当于我国陆上和近海石油天然气总资源量的二分之一。

参考文献:

- [1] Barker J W. Formation of hydrates during Deepwater Drilling Operations[R], SPE/IADC16130, 1987, 15—18.
- [2] Bishnoi P R. The kinetics of gas hydrate formation pt. II [R], Final Report to Gas Research Institute, 1980, 34—40.
- [3] Buckilin R W. Hydrate control of natural gas under Arctic conditions using TEG[R], 1985, 10—15.
- [4] Ciesnik M. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate locations: basin analysis.

- formation and stability of gas hydrates in the Black Sea[J]. US Department of Energy, DOE/MC, 1987, **11**, 1950—1958.
- [5] Dillon W P. Natural gas hydrates: Properties, Occurrence and Recovery[R], J. L. Cox, eds., 1983, 73—80.
- [6] Lawson W F. "Acoustic velocity and electrical property measurements in the DSDP methane hydrate core" [R], 1984, paper presented at the 1984 Winter Meeting of AIChE, Atlanta, 23—29.
- [7] Trofimuk A A. "Possible gas reserves in the continental and marine deposits and the methods of their prospecting and development", presented at the Unconventional World Natural Gas Hydrate Resources[R], Laxenburg, Austria, 1980, 12—20.
- [8] Finley P, Krasin J. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate locations: basin analysis, formation and stability of gas hydrates in the Middle America Trench[J]. US Department of Energy, DOE/MC, 1950, **97**, 21181—21187.
- [9] Krasin J, Ciesnik M. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate locations: basin analysis, formation and stability of gas hydrates of the Aleutian Trench and the Bering Sea[J]. US Department of Energy, DOE/MC, 1950, **10**, 1987—1992.
- [10] Aoki Y, Kato S. Studies in continental margin Geology[J]. J. S. Drake, eds., AAPG, Memoir, 1983, **34**, 309—322.
- [11] Kvenvolden K A, Rapp J B. The Antarctic continental margin: geology and geophysics of offshore Wilkes Land and the Western Ross Sea[R]. A. K. Cooper, eds., Circum-Pacific Council for energy and mineral resources, Earth Science Series, 1987, 205—210.
- [12] Krasin J. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate locations: basin analysis, formation and stability of gas hydrates in the Western Gulf of Mexico[J]. US Department of Energy, DOE/MC, 1985, **3**, 1950—1962.
- [13] Krasin J. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate locations: Blake—Bahama Outer Ridge—US East Coast[J]. US Department of Energy, DOE/MC, 1985, **2**, 19—23.
- [14] Makogon Y F. Natural gas hydrates: the state of study in the USSR and perspectives for its use[R]. at the Third Congress of North America, Toronto, Canada, 1988, 33—39.
- [15] Collett T S. Geologic interrelations relative to gas hydrates within the north slope of Alaska[R]. Final Report DE—AI21—83MC20422, US Department of Energy, 1988, 23—29.
- [16] 冯文科, 鲍才旺. 南海地形地貌特征[J]. 海洋地质研究, 1982, **4**, 23—32.
- [17] 薛万俊. 南海地貌图[A]. 南海地质地球物理图集[M]. 广州: 广东地图出版社, 1987.
- [18] 鲍才旺. 南海地形图[A]. 南海地质地球物理图集[M]. 广州: 广东地图出版社, 1987.
- [19] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, **6**(2): 1—13.
- [20] 姚伯初. 南海南部地区的新生代构造演化[J]. 南海地质研究, 1994, **6**, 1—15.
- [21] Hutchison C. Formation of marginal seas in Southeast Asia by rifting of Chinese and Australia continental margins and implication for Borneo region[J]. Geo. Soc. Malaysia Bulletin 1986, **20**, 201—220.
- [22] Longley I M. The tectonostratigraphic evolution of SE Asia[R]. in A. J. Fraser eds. Petroleum Geology of Southeast Asia, 1997, 311—339.
- [23] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, **18**(4): 11—18.
- [24] Gornitz, V, Fung V A. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans[J]. Global Biogeochem. Cycles, 1994, **8**, 335—347.
- [25] Mikio Satoh. Estimation of amount of methane and resources of natural gas hydrates in the world and around Japan[J]. Jour. Geol. Soc. Japan, 1996, **102**(11): 959—971.

THE GAS HYDRATE IN THE SOUTH CHINA SEA

YAO Bo-chu

(Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075 China)

Abstract: The area where water depths are more than 400m is $93 \times 10^4 \text{ km}^2$, there may exist gas hydrates. The topography on the slopes and rises is complex, there are a lot of sea mounts, sea hills, troughs, sea valleys, submerged reefs and shoals. There were a series of tectonic movements in Mesozoic and Cenozoic in the area, but there was no movement since end of middle Miocene. There was regional subsidence, and a sub-horizontal sediments were deposited in a stable environment since end of middle Miocene. Under these sub-horizontal sediments there were many faults formed by the movements. This is favourable for the up-going fluid from below sediments. The sediments since end of middle Miocene have been in the stable zone of gas hydrate, the gases in the fluid from below sediments flowed up along the faults into the sediments since middle Miocene as a gas source forming the gas hydrate, including the gases formed in the sediments since middle Miocene. Therefore, we believe that there is abundant gas hydrate in the slopes and rises of the South China Sea. We calculated the gas hydrate resources in the area according to the data obtained from the South China Sea area and world's parameters on the gas hydrate. The total resources are 6.435×10^{13} — $7.722 \times 10^{13} \text{ m}^3$ gases.

Key words: topography and geomorphology; tectonic movement; gas hydrate; resources; South China Sea