

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2008.03093

南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源

姚伯初¹, 杨木壮²

(1 广州海洋地质调查局, 广州 510075; 2 广州大学 地理科学学院 广州 510006)

摘要:南海在新生代经历过两次海底扩张产生了南海洋盆。南海北部和南部原来都是被动大陆边缘,但北部在晚新生代由于菲律宾海板块与欧亚板块在台湾地区发生了碰撞,使陆缘遭受到北西向挤压,在陆缘上产生了北西向左旋走滑活动,我们命名此次构造活动为东沙运动;南部陆缘在早中新世末由于南移的南沙地块与婆罗洲地块发生了碰撞,加上此时北移的菲律宾海板块在明都洛岛地区与欧亚板块发生碰撞,以及南部的东南苏拉威西地块与西北苏拉威西地块发生碰撞,在南海南部产生了挤压构造,我们命名此次构造运动为南沙运动。这两次新生代的构造运动改变了南北陆缘的性质,北部陆缘有人因此称之为准被动陆缘,而南部陆缘的南部则变成了挤压边缘。南海南北陆缘在晚新生代受到的挤压活动,对油气成藏和天然气水合物的形成有重要的推动作用,因为挤压活动有利于流体的流动,进而在适当的地方形成油气藏和天然气水合物。

关键词:构造运动;天然气水合物;流体;左旋走滑断裂;南海

中图分类号: P744.4 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2008)04-0093-08

1 南海的地形地貌

南海是一棱形海盆,北东长 1 600 km,东西宽 700 km,水深在 3 000~4 400 m 之间。陆架边缘大体沿 200 m 水深线延展,陆坡与深海平原的边界大约沿 3 000 m 水深线延伸(图 1)。北部广东陆架宽 150~300 km,南部巽他陆架宽 600 km,是最宽的陆架之一。东部和西部陆架很窄,仅数十千米^[1-2]。陆架地形平坦,在大河岸外分布着水下三角洲,如北部陆架上的珠江水下三角洲,西南部的湄公河三角洲等。陆坡地形复杂,分布着众多的海山、海丘、海槽、海谷和海台。如北部陆坡上,海山、海丘呈线状分布,自神狐暗沙与一统暗沙起,经南卫滩和北卫滩至台湾浅滩,为一北东向海丘链,海丘高 200~600 m。在其南部,自双峰海山经尖峰海山至北坡海山,为一北东向海山链,海山高度大于 1 000 m。在中沙群岛之南,分布着一系列北东向排列的海山与海谷,山与谷相间排列。著名的海槽有西沙海槽、中沙海槽、礼乐海槽和南沙海槽,著名的海谷有东沙海谷和珠江海谷。南海南部陆坡宽达 400 km,地形切割强烈,崎岖不平。这里分布着 230 多座岛屿、沙洲、暗沙、暗礁和暗滩,是航海的危险地区。

南海深海平原的水深为 300~4 400 m,海底平坦,海山广布。根据水深线及海山的走向,可将其分为 3 个次海盆:西北次海盆、中央海盆和西南次海盆。西北次海盆位于中沙群岛以北,西沙海槽之东,水深为 3 000~3 800 m。海底自西向东倾斜,中间分布着北东向的双峰海山。这里新生代沉积厚 1.5~2.0 km,因此,层 2 顶部埋深 4.5~5.8 km。地壳厚 5.0~5.8 km,等厚线沿北东向展布^[3]。中央海盆呈长方形,南北长 900 km,东西宽 450 km。海底上分布着一系列东西向的海山、海丘,著名的黄岩海山分布在海盆中部。海盆水深 3 000~3 900 m,个别地方达 4 000 m。新生代沉积厚 0.5~2.4 km,层 2 顶部埋深在 3.5~5.5 km,海盆中部高,向南向北下倾,反映海盆中部的洋壳之年龄较小,向南向北逐渐变老。西南次海盆的水深为 4 300~4 400 m,是南海深海平原上最低洼之处。这里新生代沉积厚 1.0~2.0 km,因此层 2 顶部埋深 5.3~7.5 km。海盆中部分布着北东走向的长龙海山,到 114°E 处与南北走向的中南海山相遇,终止于此。

2 南海新生代构造运动

大南海地区位于欧亚板块的东南边缘,澳大利亚板块北部边缘的北部,它包含许多小洋盆和地块。这些地块中,有一部分是在新生代经构造运动从印支地块和华南地块分离出来的,另一部分是从澳洲板块分离并向北漂移过来的;而大部分小洋盆是在

基金项目: 国家自然科学基金项目(40746028)
作者简介: 姚伯初(1937—),男,教授级高级工程师,从事海洋地球物理研究, E-mail: bcyao@163.net
收稿日期: 2008-04-08; 改回日期: 2008-08-06. 周立君编辑

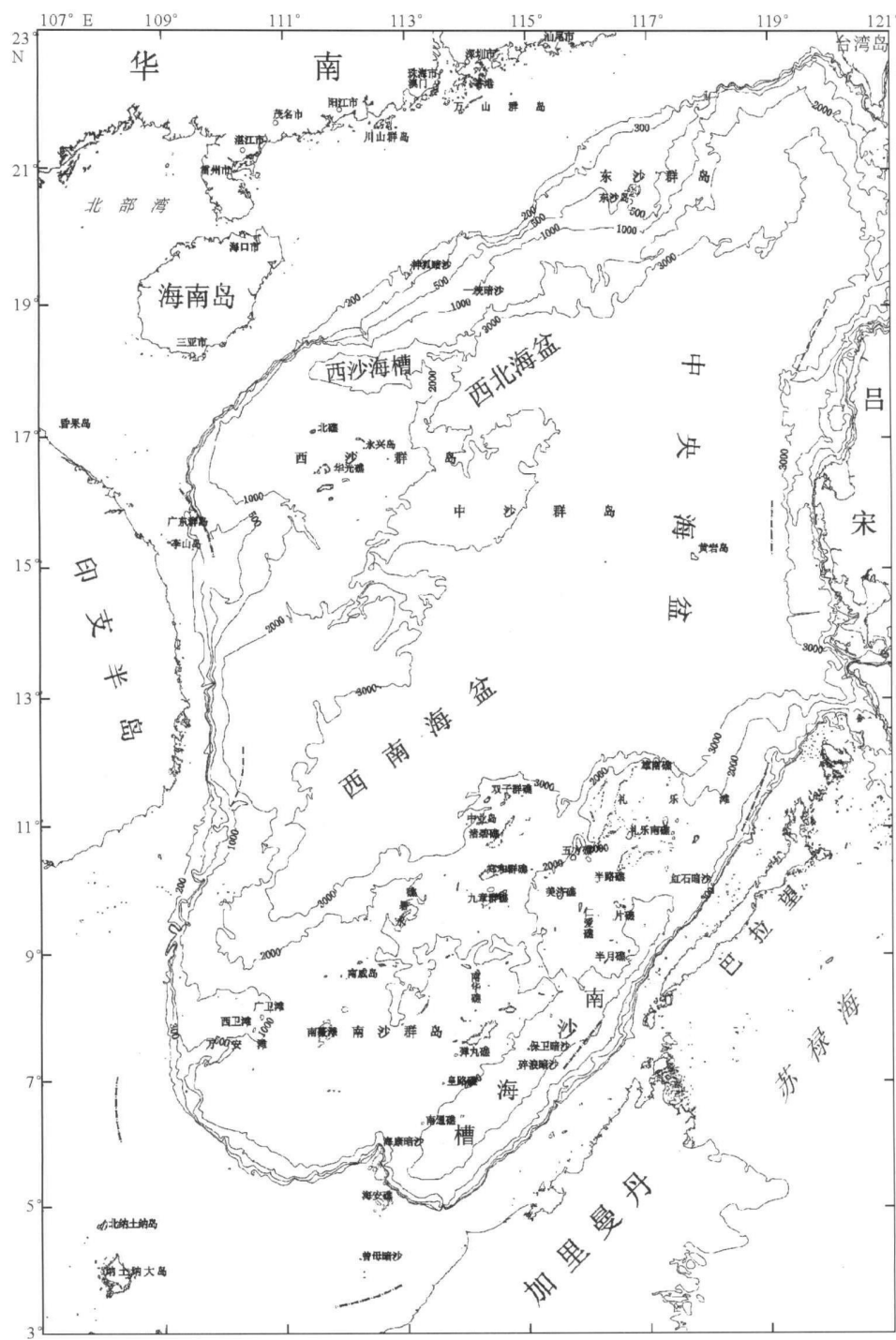


图 1 南海地形图

Fig. 1 The topographic map of the South China Sea

地块运动过程中由海底扩张形成的。另外, 菲律宾海板块在新生代从赤道附近向北漂移, 到大约 5 Ma 前, 在台湾地区与欧亚板块接触并开始碰撞, 基本接近今日的位置。

在约 90 Ma 前, 位于欧亚板块边缘的加里曼丹地块和从澳大利亚板块漂移过来的米拉塔斯(Meratus)地块发生了碰撞, 形成了西加里曼丹地块, 即西南婆罗地块^[4]。米拉塔斯地块包含今日的东北爪

哇岛、西南加里曼丹和西苏拉威西岛。这次碰撞引起古南海盆向加里曼丹-苏禄地块俯冲, 在北部亚洲边缘产生一次北东向张裂构造运动。在大约 85 Ma 时, 燕山运动造山带的岩石圈发生拆沉, 也产生北东向张性构造运动。这两次时间间隔很短的运动迭加在一起, 在南海北部被命名为神狐运动, 在南海南部被命名为礼乐运动。神狐运动在东亚边缘产生北东向断裂和地堑半地堑, 它们后来发育成沉积盆

地。在米拉塔斯地块南部, 即苏门答腊和爪哇南部, 印度-澳大利亚板块向北俯冲, 印度洋沿爪哇海沟斜向俯冲于欧亚板块之下。菲律宾海板块此时位于赤道之南, 在其南部, 印度洋板块向北俯冲; 在其北部, 北新几内亚板块向南俯冲; 在 44 Ma 前, 菲律宾海作为弧后扩张, 开始形成西菲律宾洋盆。

在 65 Ma 时, 印度板块和欧亚板块发生了碰撞, 此次碰撞是板块边缘的接触碰撞; 到约 43 Ma 时, 两大板块开始硬碰撞, 即板间海域消失, 大陆岩石圈开始碰撞。此次碰撞引起亚洲板块向东南方向运动^[5-7], 在东亚边缘产生了又一次张性构造运动, 南海地区称做南海运动(南海北部)或西卫运动(南海南部)。此次运动在该地区引起又一次张裂活动, 神狐运动形成的地堑半地堑被进一步拉开, 加上岩石圈张裂后的均衡沉降和热沉降, 沉积盆地发展史进入第二阶段——坳陷阶段。此次运动之后, 南海地区发生第一次海底扩张: 南沙地块向东南方向运动, 在其后面, 由海底扩张而形成了南海西南海盆与西北海盆。在约 35 Ma 时, 向南运动的南沙地块与西南加里曼丹(巽他)地块发生碰撞, 西南海盆的海底扩张停止了。Longley^[8]认为这是一次关键事件, 他将南沙地块称做路科尼亚地块(Luconia block)。Haile^[9]在沙捞越地区的露头中发现了晚始新世不整合面, Murphy^[10]根据时代地层学解释也认为是晚始新世。Hutchson^[11]发现, 由于印度板块和欧亚板块在 43 Ma 时发生碰撞, 印度洋的扩张脊从东北印度洋跳到东南印度洋, 引起了区域板块位置调整。同时, 他在东南亚地区普遍发现了一个晚始新世不整合面, 他认为与这次构造运动与区域板块位置调整事件有关。在 43 Ma 前, 太平洋板块的运动方向由 NNW 转向 NWW, 北新几内亚板块已俯冲殆尽。新几内亚-太平洋脊的俯冲引起伊豆-小立垣-马里亚纳前弧玻古安山岩喷发, 三描理士-吕宋蛇绿岩是这个玻古安山岩弧的西部。印度-澳大利亚板块继续向北俯冲于欧亚板块之下, 西菲律宾海盆的扩张脊向西延伸到吕宋岛之南, 苏拉威西海盆在 43 Ma 前开始海底扩张。由于南海西南海盆在 42 Ma 前开始海底扩张, 古南海洋盆的西部继续俯冲于西南婆罗之下。

在 32 Ma 时, 位于华南地块东南边缘的礼乐-东北巴拉望地块开始和亚洲大陆分离, 向南漂移, 其间开始南海新生代第二次海底扩张。引起此次海底扩张的深部构造原因可能是由于印度板块和欧亚板块的碰撞, 而引起的亚洲大陆上地幔向东南方向之地幔流, 受到东部边缘向欧亚板块俯冲的太平洋板块

之阻挡, 转而向南流动, 带动亚洲板块东南边缘地块向南运动, 从而使有些地块(如礼乐-东北巴拉望地块)与亚洲大陆分离, 其间产生海底扩张。在 34 Ma 前, 西菲律宾海盆和苏拉威西海盆的海底扩张停止了, 东菲律宾海(帕里西威拉海盆)开始海底扩张。而古南海洋壳的东部继续向东北婆罗-西南巴拉望地块之下俯冲, 带动礼乐-东北巴拉望地块向南运动。

在约 25 Ma 时, 逆时针方向旋转的菲律宾海板块南端俯冲带和澳洲板块北端发生了碰撞, 澳洲板块北部的印度洋向菲律宾海板块的俯冲停止了, 俯冲带逐步变成了左旋走滑断裂, 即索琅断裂。在此时, 印支地块仍在向东南方向挤出, 但它的挤出量可能被巽他陆架和泰国湾的伸长所吸收^[12]。此次碰撞运动对南沙地块和礼乐-东北巴拉望地块产生影响, 造成区域上的挤压。到大约 17 Ma 前, 该地块和东北婆罗-西南巴拉望地块碰撞, 海底扩张停止, 南海中央海盆诞生了。在约 15 Ma 时, 向北运动的菲律宾海板块上的吕宋岛与欧亚板块的卡加延脊(苏禄海盆内)及北巴拉望发生了碰撞, 引起了苏禄小洋盆向苏禄弧的俯冲。在 13 Ma 时, 从澳洲板块上刮下来的东南苏拉威西地块和西苏拉威西地块(属欧亚板块)发生了碰撞, 此次碰撞加快了巽他地块的逆时针方向旋转。在 11 Ma 时, 礼乐-东北巴拉望地块和加里曼丹-苏禄地块发生了碰撞, 在东北婆罗(沙巴地区), 浅层区域不整合面就和此次碰撞有关。这三次时间间隔很短的碰撞事件对南沙地块都产生强烈影响, 造成了新生代沉积中的晚中新世区域不整合面。在南沙地区被命名为万安运动。

在 6 Ma 时, 斑垓-苏禄地块和巽他地块发生了碰撞^[13], 这次碰撞在东爪哇盆地产生背斜构造, 对南沙地区也产生一定影响。在 5 Ma 时, 菲律宾弧和巴拉望地块发生过碰撞^[14], 引起吕宋岛边缘的俯冲带从西边跳到东边。这次碰撞对西北巴拉望盆地和沙巴盆地产生影响, 对南沙地区也产生一定影响。这两次时间相隔很短的碰撞事件在南沙海域新生代沉积中产生了中新世和上新世之间的不整合面。在 5 Ma 前, 向北运动的菲律宾海板块在台湾地区与欧亚板块发生碰撞, 台湾岛开始出现并逐渐形成。

3 南海海域沉积盆地及其油气资源

南海海域分布着许多新生代沉积盆地, 从北到南, 有台西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地、西沙海槽盆地、中建南盆地、万安

盆地、曾母盆地、北康盆地、南薇盆地、礼乐盆地、西北巴拉望盆地、文莱-沙巴盆地、西纳土纳盆地、马莱盆地等大中型新生代沉积盆地(图 2)。在南海北部,目前只有珠江口盆地和莺歌海盆地发现了几个大型油气田,其余盆地仅发现中小型油气田。南海北部沉积盆地油气年产量不超过 1 400 万 t,而在南海南部,目前已发现许多大中型油气田,年产量超过 5 000 万 t。很显然,南海南部的油气资源比南海北部丰富,是什么原因造成这样的格局呢?

南海北部在新生代为被动大陆边缘,除莺歌海盆地外,其余盆地大都起源于中生代末至新生代早期。当时这里发生了神狐运动,一系列北东向张性断裂开始发生,在地表产生一系列北东向地堑半地堑,此后在它们之中沉积了湖相沉积,直到始新世末,由于热沉降,陆缘逐步沉于水下,广泛接收海陆交互相和海相沉积,沉积盆地逐渐形成。在始新世时,这些湖泊的面积逐步加大,深度加深,湖底接受了富含有机质的烃源岩。由于这些彼此分割的湖泊

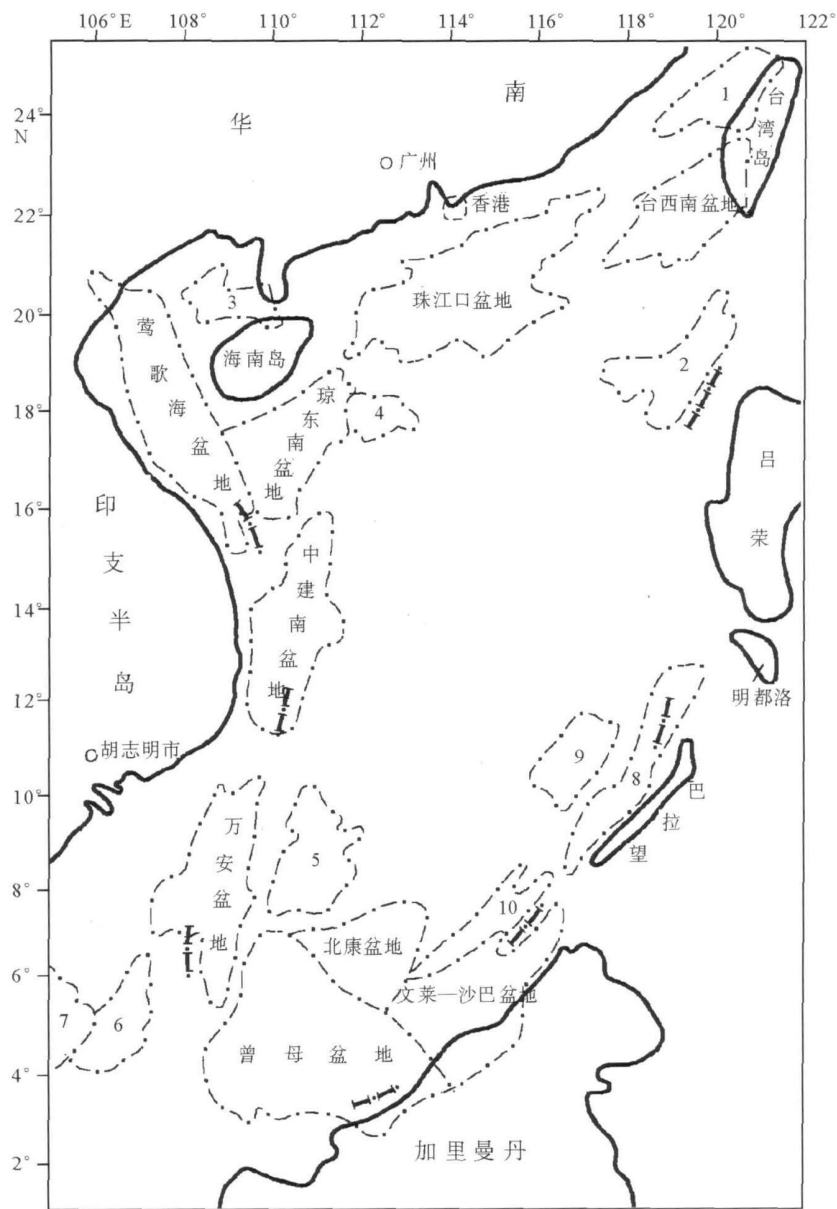


图 2 南海沉积盆地分布图

1-台湾海峡盆地; 2-笔架南盆地; 3-北部湾盆地; 4-西沙海槽盆地; 5-南薇盆地;
6-西纳土纳盆地; 7-马莱盆地; 8-西北巴拉望盆地; 9-礼乐盆地; 10-南沙海槽盆地

Fig. 2 The distribution map of sedimentary basins in the South China Sea

1-the Taiwan Strait Basin; 2-the Bijianan Basin; 3-the Beibuwan Basin; 4-the Xisha Trough Basin; 5-the Nanwei Basin;
6-the West Natuna Basin; 7-the Malaya Basin; 8- the Northwest Palawan Basin; 9-the Liyue Basin; 10-the Nansha Trough Basin

之面积不太大, 沉积厚度有限, 因此, 其沉积的烃源岩之体积不大, 所产生的油气资源之量有限, 这也决定了这些沉积盆地不可能存在太多的大型油气田。例如珠江口盆地中最大的凹陷是惠州凹陷, 其面积在一万平方千米左右。而在南海南部, 除万安盆地为走滑拉张盆地外, 曾母盆地是前陆盆地, 文莱-沙巴盆地和西北巴拉望盆地为前弧盆地。这些盆地从形成之时就开始广泛接受比较封闭环境的海相沉积, 始新统和渐新统以及下中新统皆为烃源岩。这些烃源岩的面积和厚度均较大, 因而其体积也大, 如曾母盆地的康西凹陷, 面积达五万平方千米, 沉积厚度超过 15 000 m。所以, 南海南部沉积盆地的烃源岩之体积比北部沉积盆地大得多, 因此, 这些盆地具有产生许多大型油气田的物质条件。

第二方面原因是地温梯度差异。用地热流测量仪测量的热流资料和石油钻井地温测井曲线计算的热流资料, Wang 等人^[13] 勾划出南海地热流分布图。从热流等值线图看出, 地热流值和地质构造分区具有紧密的相关性。在南海北部陆缘, 热流值一般约为 60 mW/m², 与稳定大陆的热流相近; 而在南海南部海区的热流值非常高, 如曾母盆地的平均热流值达 97 mW/m²。在南部边缘的西部, 沿北东方向分布着几个高热流值区: 在 6°~7°N、119°~111°E 处分布一高热流值区, 热流值在 90~130 mW/m² 之间, 走向北北东, 这是分布在曾母盆地西北部的高热流值区。另一高热流值区的地理位置是 9°~14°N、109°~113.5°E, 热流值为 90~130 mW/m², 走向亦为北北东。在第一个高热流值区的南部还有一高热流区, 热流值在 100~130 mW/m² 之间, 走向为南北向。此高热流区分布在曾母盆地的南部。南海南部高热流值, 反映这里地温梯度大。和南海北部相比, 在同等深度上, 南海南部的温度比北部高, 因此, 南海南部更有利于沉积中的有机质转化成烃类。加上这里在新生代形成了一系列沉积盆地, 如曾母盆地、万安盆地、湄公盆地、泰国湾盆地、纳土纳盆地和文莱-沙巴盆地等, 这些盆地中沉积了巨厚的新生代沉积(6~15 km)。高地温梯度有利于沉积中的有机质转化为烃类(油气), 因此, 这里自然成为油气富集区。

第三, 在南海新生代沉积盆地中, 发育着各类局部构造。如挤压背斜、同沉积背斜、滚动背斜、披覆背斜、泥底辟、断鼻构造、不整合构造、礁岩构造和古潜山构造以及复合构造等。由于南海北部在新生代主要受张性应力场作用, 因此, 这里的挤压构造很不发育, 主要构造类型为同沉积背斜、滚动构造、断鼻

构造, 仅在台地上发育少量礁灰岩。而南海南部在晚新生代为挤压边缘, 盆地中的挤压构造比较发育, 而且在晚新生代沉降速率快, 其礁岩构造比较发育。例如, 万安盆地的万安滩 7 构造, 面积 528 km², 为一自中中新世开始发育大型碳酸盐岩台地。曾母盆地的南安 17 构造, 是一背斜构造, 面积达 486 km², 闭合高度 900 m。在面积为 1.6×10⁴ km² 的南康台地上, 自中中新世以来沉积了厚 200~300 m 的碳酸盐浅滩沉积, 发育着 200 多个礁隆构造, 最大的长达 20 km, 厚 1.5 km。钻探 43 个礁隆, 有 20 个礁体产气。已发现 F14、F13、E6、E8、F23、E11、F28、F6、M3、M1、M4、F29、D12、B11、G7 共 15 个气田。在曾母盆地西部斜坡上发现的纳土纳气田, 为一碳酸盐岩构造, 气储量达 14×10⁴ m³, 是一巨型气田。在南海北部, 已发现的油气田中, 除崖 13-1、东方 1-1 和流花 1-1 为大型油气田外, 其余均是中小型油气田。产生这一差别的原因除烃源岩和地温影响外, 主要是构造和储层特性差异所致。

第四, 在生、储、盖组合及时间搭配上, 南海南部诸沉积盆地具有很合适的组合。例如北康盆地, 其烃源岩是始新统、渐新统和下中新统, 生烃时间从晚始新世开始, 一直到第四纪; 油气运移时间从中中新世开始, 关键时期为 6 Ma; 构造形成时间从中中新世到晚中新世; 局部盖层形成时间从晚渐新世开始, 而区域盖层形成时间从晚中新世开始。因此, 构造形成时间是在生烃高峰时间之前, 有利于油气的聚集。这也是南海南部诸沉积盆地中发现如此多的大中型油气田的原因。

4 晚新生代构造运动和天然气水合物

在晚新生代, 由南向北运移的菲律宾海板块在台湾地区和欧亚板块发生了碰撞, 台湾岛逐步在亚洲边缘上形成。此后菲律宾海板块一直向欧亚板块挤压, 在南海北部边缘上产生一系列北西向左旋走滑断裂(图 3、图 4)^[16]。我们从图 3 和 4 看出, 海底北西向断裂切割沉积等厚线, 这里没有见到其他方向的断裂, 证明它们在新生代晚期已停止活动, 只有北西向断裂至今仍在活动。由于北西向左旋走滑断裂的活动, 推动沉积中的流体沿北西断裂流动, 当油气到一定合适的局部构造聚集起来, 形成含油气的局部构造, 即油气田。我们知道, 在上新世北部陆缘盆地中的烃源岩已进入大量生油阶段, 此时北西向断裂的活动, 正有利于油气运移和聚集。我们看今日珠江口盆地的油气田, 大多沿北西向成带分布, 应

是这次构造运动的结果。这说明菲律宾海板块与欧亚板块在台湾地区的碰撞,产生了北西向左旋走滑断裂活动,对南海北部陆缘油气的聚集起了重要作用。

在图 4 中,北西向断裂切割其他方向断裂,说明北西向断裂是最后活动的断裂,且至今仍在活动。这和区域构造活动是一致的,因为北东向断裂是在神狐运动(晚白垩世到早古新世)中产生的,北东东

向断裂是在南海运动(晚始新世)中产生的,而北西向断裂是在东沙运动(中中新世末)中产生的,故北西向断裂活动的时间最晚。图 5 是南海北部陆坡上的南北向地震剖面,由图看出,第四纪断裂基本是垂直断裂,并且断到海底。这些断裂就是图 4 平面图上看到的北西向左旋走滑断裂,说明这些断裂是走滑平移断裂,在剖面上表现为垂直断裂。

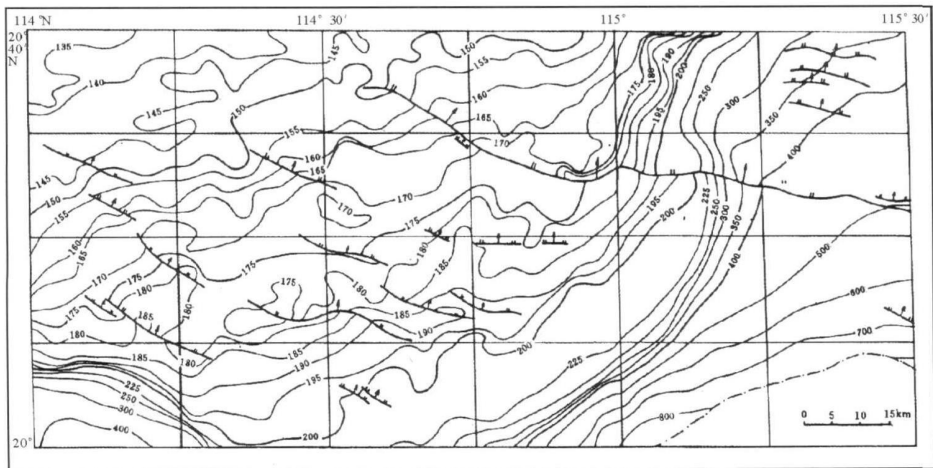


图 3 南海北部珠江口盆地海底之下的沉积等厚图

Fig. 3 Isopach map of sediments under seafloor in the Pearl River Mouth Basin, the north margin of the South China Sea

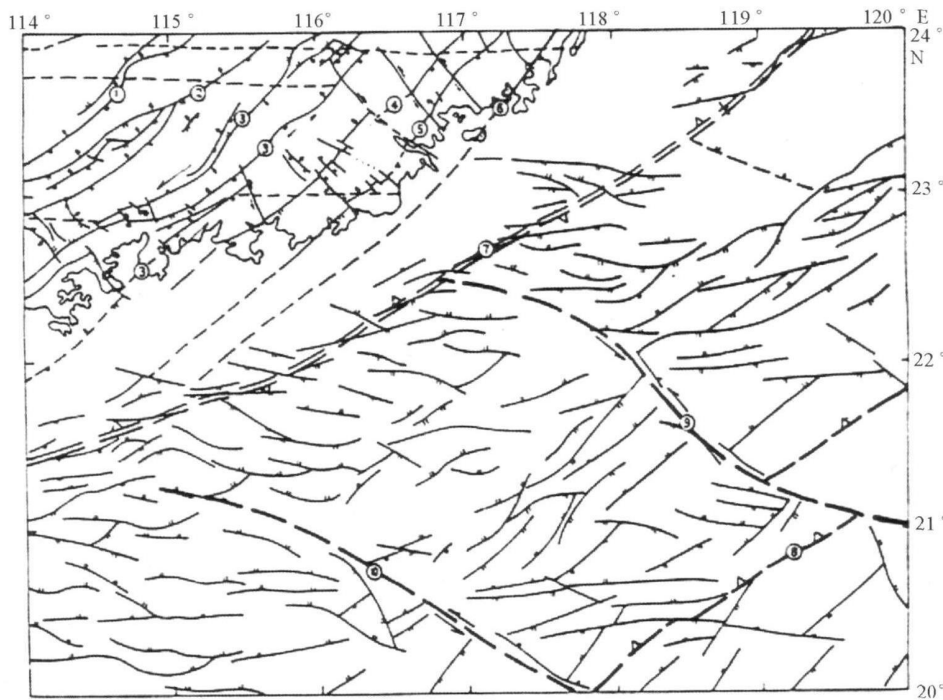


图 4 南海北部边缘东部的断裂分布图

北西断裂为左旋走滑断裂,它们切割其他方向的断裂,说明它们是最后活动的,且至今仍在活动。

Fig. 4 The distribution map of faults in the east part of the north margin of the South China Sea

On the map we can see that the NW bearing faults are left-lateral and strike-slip faults, and they have cut other bearing faults. Therefore, we believe that the NW bearing faults are the latest active faults.

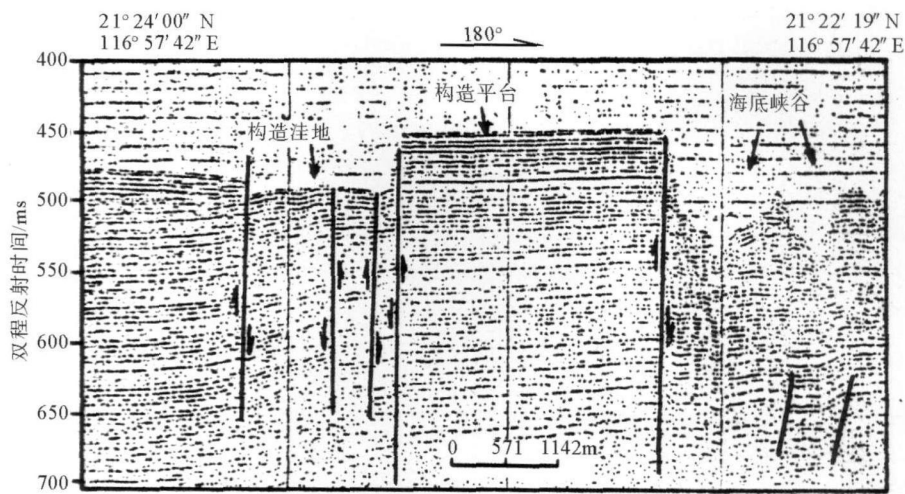


图 5 南海北部上陆坡的地震剖面
图中断裂近似垂直, 且直通海底, 说明它们现在仍在活动

Fig. 5 Seismic profile in the northern slope of the South China Sea
The faults in the map are closely vertical and come to the seafloor, this means that they are active still.

天然气水合物是以甲烷为主的气体在进入天然气水合物稳定带 GHSZ (一定的温度、压力场) 后生成的, 当温度、压力改变后, 它会分解。由于海底不断接受沉积, 沉积不断加厚, 因此, 天然气水合物稳定带由于温度上升而不断向海底上移, 原来位于稳定带底部的天然气水合物就不断分解, 分解后的甲烷气不断向上流动, 或存在于原来的沉积中, 形成游离气层。由此看来, 天然气水合物是处于一种动态平衡的环境中, 它是在不断形成和不断分解的动态过程中的固态矿物。另外, 海洋沉积中的甲烷是由微生物分解有机质而生成的, 由于沉积物中的有机质含量有限, 因此不可能生成太多的甲烷, 因此, 仅靠原地沉积物中有机质生成的甲烷量是有限的, 不可能形成太富集的天然气水合物。只有在其他地方形成的甲烷不断来到某地聚集时, 才能在该处生成富集度大的天然气水合物, 这就需要沉积物中流体的活动。如上所述, 在南海地区晚新生代都受到区域挤压构造活动, 如南海北部边缘, 由于菲律宾海板块和欧亚板块在台湾地区发生了碰撞, 并一直对欧亚板块产生北西向左旋走滑挤压, 推动沉积物中的流体沿北西向断裂活动, 包括甲烷气的流动, 到水合物稳定带的某些部位聚集起来, 形成富集的天然气水合物矿藏。

5 讨论与结论

天然气水合物是由甲烷等气体和水在一定温度和压力条件下生成的, 而海洋沉积物中的有机质在

数量上有限, 因此, 由微生物分解成甲烷的数量也是有限的, 所以, 光靠本地沉积物中的甲烷形成的天然气水合物是不太富集的, 需要从其他地方生成的甲烷流到某处集中, 才能在该处形成富集的天然气水合物。南海北部和南部就有这样的构造条件, 在南海北部, 向北运动的菲律宾海板块在晚新生代与欧亚板块在台湾地区发生了碰撞, 对南海北部陆缘进行着北西向挤压, 产生了一系列北西向左旋走滑断裂, 这次构造活动一直延续到现在。由于北西向挤压应力的驱使, 使流体沿北西向断裂流动。这样, 在表层沉积物中由微生物分解有机质而生成的甲烷沿北西向断裂流动, 到稳定带的某些部位聚集起来, 形成富集的天然气水合物矿藏。这个过程一直延续到现在, 使得南海北部具有丰富的天然气水合物矿藏。从南海北部北西向断裂活动来看, 陆缘的东部最强烈, 因此, 东部的油气和天然气水合物最丰富, 中部次之, 西部则要从其他构造因素去考虑。由此看来, 从油气聚集和甲烷等流体活动来看。晚新生代的构造活动都是有利的构造因素, 尤其是南海北部左旋走滑构造活动更是一种非常有利的构造因素。

参考文献 (References)

[1] 薛万俊. 南海地貌图 [C] // 南海地质地球物理图集. 广东省地图出版社, 1987. [XUE Wan-jun, Explanation for Map of Geomorphology [C] // Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Map Publishing House of Guangdong Province, 1987.]

[2] 鲍才旺. 南海地形图 [C] // 南海地质地球物理图集. 广东省地图出版社, 1987 [BAO Cai-wang, Explanation for Map of To-

- pography[C] // Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Map Publishing House of Guangdong Province, 1987.]
- [3] 姚伯初, 王光宇. 南海海盆的地壳结构[J]. 中国科学 B 辑, 1983 (2): 177-186. [YAO Bo-chu, WANG Guang-yu. Crustal structure of the South China Sea Basin[J]. Science in China(Series B), 1983, 26: 648-661.]
- [4] Bransden P J E, Matthews S J. Structural and stratigraphic evolution of the East Java Sea, Indonesia[C] // Proceedings of the 21st Annual Convention of the Indonesia Petroleum Association. 1992, 1: 417-454.
- [5] Tapponier P, Peltzer G, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982, 10: 611-616.
- [6] Tapponier P, Peltzer G, Argijio R. On the Mechanics of the Collision between India and Asia, in Coward[M]. Collision Tectonics. Geological Society of London Special Publication, 1986, 19: 115-157.
- [7] Briais A, Patriat P, Yappionier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 6 299-6 328.
- [8] Longly I M. The Tectonostratigraphic Evolution of SE Asia [M]. Petroleum Geology of Southeast Asia Geological Society Special Publication, 1997, 126: 311-339.
- [9] Haile N S. Evidence of Multiphase deformation in the Rajang-Crocker Range(northern Borneo) from Landsat imagery interpretation: geodynamic implication-comment(2)[J]. Tectonophysics, 1992, 204: 178-180.
- [10] Murphy R W. The Manila trench-west-Taiwan fold belt: A flipped subduction zone[J]. Bull. Soc. Malays., 1973, 6: 27-42.
- [11] Hutchison C S. The Eocene unconformity on Southeast and East Sundaland[J]. Geol. Soc. Malaysia Bulletin, 1992, 32: 69-88.
- [12] Hall R. Cenozoic Plate Tectonics Reconstructions of SE Asia [M]. Petroleum Geology of Southeast Asia, Geol. Soc. Special Publ., 1997, 126: 1-23.
- [13] Handiwiria Y E. The stratigraphy and hydrocarbon occurrences of the Salodik Group, Timori PSC area East Arm of Sulawesi[C] // Proceedings of PIT 19. Ikatan Ahli Geological Indonesia, Bandung 1990: 11-13.
- [14] Hutchison C S. Geological evolution of Southeast Asia[C] // Oxford Monographs on Geology and Geophysics, Clarendon Press, Oxford, 1989, 13.
- [15] WANG Jiyang, LI Nai-sheng, et al. Geothermics in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [16] 姚伯初. 南海北部陆缘新生代构造运动初探[J]. 南海地质研究, 1993, 5: 1-12. [YAO Bo-chu. The explanation of tectonic in north margin of South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 1993: 51-12.]

TECTONIC MOVEMENTS IN THE LATE CENOZOIC AND GAS HYDRATE RESOURCES IN THE SOUTH CHINA SEA

YAO Bo-chu¹, YANG Mu-zhuang²

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 2 Guangzhou University, Guangzhou 510006 China)

Abstract: There in the South China Sea area occurred two seafloor spreadings in Cenozoic that produced the South China Sea Basin. The north and south margins were passive originally in Cenozoic, but in the late Cenozoic the Philippine Sea Plate collided with Asian Plate, which compressed the north and south margins partly. In these two margins there were left-lateral and strike-slip faults in late Cenozoic. We named this phenomenon Dongsha movement in the north margin and Nansha movement in the south. Therefore, we call the two margins similar-passive margins. As the left-lateral and strike-slip faults were active in the margins in late Cenozoic, fluids flowed along the faults. Oil and gas (including the methane) flowed into some favorable positions (anticline, faulting anticline and stratigraphic trap etc.), then petroliferous structures were formed. Gas hydrate resources are abundant in the gas hydrate stability zone (GHSZ) because of the NW bearing left-lateral and strike-slip faults. Therefore, we believe that the NW bearing left-lateral and strike-slip faults are very good tectonic conditions for the formation of gas hydrate resources in the north and south margins of the South China Sea area.

Key words: tectonic movement; gas hydrate; fluid; left-lateral and strike-slip fault; South China Sea