

南海岩石圈结构与油气资源分布

万 玲^{1,2} 姚伯初² 曾维军² 吴能友² 夏 斌¹ 朱本铎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. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

提 要:南海是中国唯一发育有洋壳的边缘海,是世界四大海洋油气聚集中心之一。油气勘探表明,南海的油气田分布在北部、西部和南部陆缘沉积盆地内,而大中型油气田集中分布在西部海域盆地中,自北而南有莺歌海—琼东南盆地、万安盆地、涠公盆地、曾母盆地和文莱—沙巴盆地,且以含气为主,含油次之。此外,这一区域深水区还存在多个潜在的大型含油气盆地。研究发现,南海的油气分布与深部岩石圈结构有密切关系。在构造上,南海的含油气盆地处于岩石圈块体边缘或之上,受控于大型岩石圈断裂的发育与演化。在油气富集的盆地中,莫霍面显著凸起,与盆地基底形成镜像,地壳厚度最薄处仅数千米厚,热流值明显较周围地区高,热岩石圈厚度大大减薄。地震层析成像结果反映,这些盆地深部发育一条规模宏大的北西向上地幔隆起带,自红河口向东南穿越南海西部海盆,一直延伸到婆罗州东北部地区,在宏观上控制了南海的油气分布与富集。

关 键 词:岩石圈结构; 油气资源; 南海

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3657(2006)04-0874-11

越来越多的研究表明,赋存在地球最表层沉积内的油气的分布与富集受岩石圈深部结构的控制 and 影响^[1-3]。南海是西太平洋边缘海盆中发育了成熟洋壳的边缘海,其岩石圈结构十分复杂,具有强烈的非均一性,是中外地球科学家关注的热点地区^[4-13]。同时,南海蕴含着丰富的油气资源,是世界四大海洋油气聚集中心之一,成为国内外石油公司投资的重点地区之一。南海为何有如此丰富的油气资源,南海的油气资源与其深部结构之间具有什么样的内在联系?从深部结构研究出发探索包括油气在内的矿产资源的形成与分布规律是“中国岩石圈三维结构”研究专项的科学目标之一,南海所具有的复杂地质构造现象和丰富的油气资源,使其成为研究油气富集与深部岩石圈结构之间关系的一个绝佳场所。笔者在分析南海岩石圈结构和油气资源分布基础上,深入探讨了深部结构对油气生成、富集和分布的重要影响。

1 区域地质背景

南海是西太平洋的一个大型边缘海,处在欧亚板块、印

度—澳大利亚板块和菲律宾海—太平洋板块相互作用的交接处,具有复杂的构造背景和独特的岩石圈结构特征。南海被性质不同、活动特征有显著差异的岩石圈断裂所围限^[14-16](图 1),其北缘以琼北—珠外—台湾海峡断裂带与华南大陆分开,在北部陆缘发育了一系列阶梯状拆离断层及不同规模的隆、坳构造带,属张裂大陆边缘;西缘以南海西缘断裂带与印支板块分隔,具较大的剪切活动性,为走滑—拉张型边缘;南缘为卢帕尔—武吉米辛—沙巴北缝合带,这是一条复杂的褶皱增生带,发生过多次聚敛活动,由南而北发育一系列逆掩的叠瓦状构造,属挤压型或聚敛型大陆边缘;东缘以马尼拉海沟与台湾—吕宋岛弧连接,是南海海盆向东俯冲形成的现代活动岛弧带,属俯冲型边缘。

南海及其邻区由来源不同的多个岩石圈碎片拼合而成^[17]。中生代末期,华南与印支大陆东南边缘在早期活动陆缘背景下发生裂解和海底扩张,形成被动大陆边缘和南海洋盆,古南海陆缘分裂成为台琼块体、中西沙块体和南沙块体(图 1)。南沙块体内部进一步划分出礼乐—东北巴拉望地块、永署—

收稿日期:2006-05-18;改回日期:2006-07-10

基金项目:国土资源部重点科技专项计划项目(20001010205);国家重大基础研究发展规划项目(G2000046705)和广州海洋地质调查局科研项目(GZJK200401)共同资助。

作者简介:万玲,女,1969年生,博士,教授级高级工程师,主要从事南海区域地质、深部构造和深水油气战略研究;E-mail:wanling@163.com。

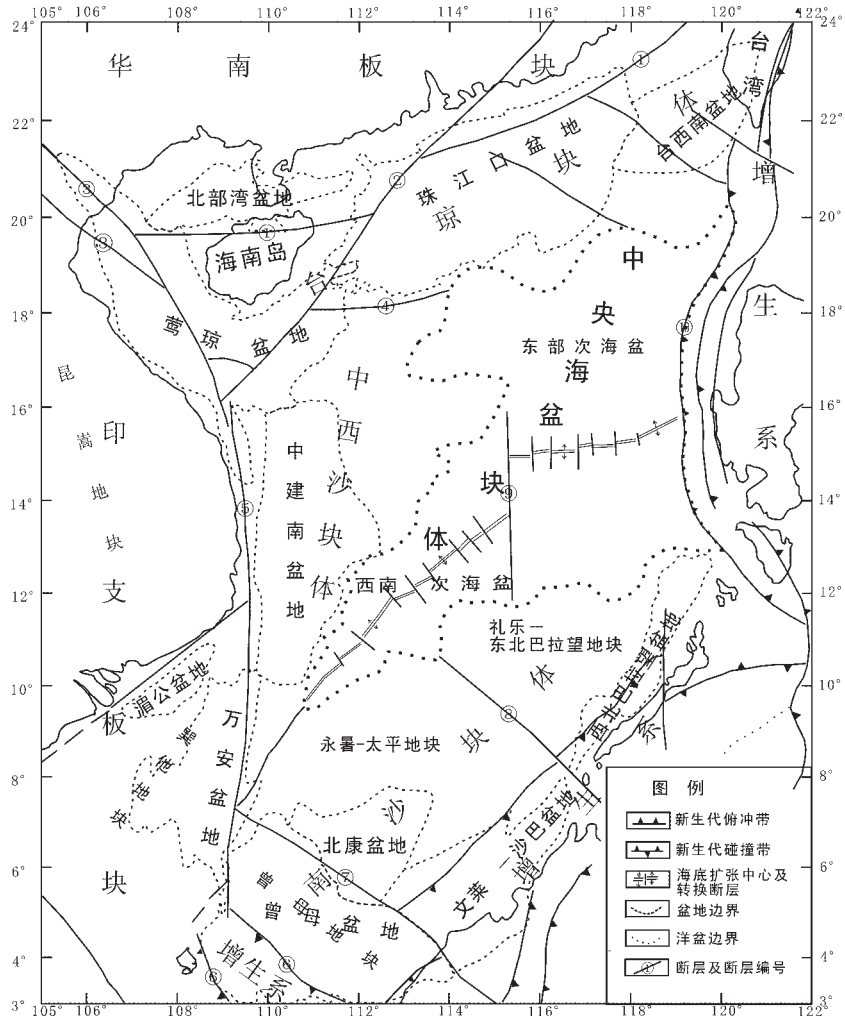


图 1 南海构造格架图

- ①—琼北—珠外—台湾海峡断裂;②—莲花山断裂;③—黑水河—红河断裂带;④—西沙海槽断裂;⑤—南海西缘断裂;
- ⑥—卢帕尔—武吉米辛断裂带;⑦—廷贾断裂;⑧—巴拉巴克断裂;⑨—中南—礼乐断裂;⑩—马尼拉海沟断裂带

Fig.1 Tectonic framework of the South China Sea

- ①—Qingbei-Zhuwai-Taiwan Strait fault; ②—Lianghuashan fault; ③—Song Da-Red River fault zone; ④—Xisha trough fault;
- ⑤—Western South China Sea marginal fault; ⑥—Lupalu-Bukit-Mersing fault zone; ⑦—Tinjar fault;
- ⑧—Balabac fault; ⑨—Zhongnan-Liyue fault; ⑩—Manila trench fault

太平地块和曾母地块。在南沙海槽西南段和台湾西南的深水区,可能还保存有中生代的残留洋壳^[12,14-16]。

南海周缘分布着一系列性质各异的新生代沉积盆地(图 1),主要沿各岩石圈块体边缘的大型断裂发育,在南海西部海域自北而南发育有莺歌海—琼东南盆地、中建南盆地、万安盆地、曾母盆地等多个大型含油气盆地,盆地奠基于新生代初期区域张性应力场背景。莺歌海盆地位于印支板块与华南板块的缝合带之上,盆地东北部钻井揭示基底岩性与邻近的海南岛类似,由变质岩、古生代碳酸盐岩、中生代火成岩和红层组成。越南北部和河内坳陷资料表明,莺歌海盆地西南部基底由古生代碳酸盐岩、中生代含煤地层和红层组成。

新生代期间,红河断裂带的走滑拉分活动形成 NW 向的莺歌海盆地;琼东南盆地位于台琼块体之上,受由粤东陆区延伸到海域的 NE 向莲花山断裂带构造活动控制,据钻井资料,盆地基底与海南岛前新生代地层相似;中建南盆地和万安盆地分别位于南海西缘断裂带的东西两侧,万安盆地位于印支板块东南缘,大量钻井钻遇中生代中酸性火成岩,盆地基底是由岩浆作用复杂化的前新生界所构成。曾母盆地位于南沙块体向婆罗洲俯冲消减形成的加积增生系之上,是一个具有复杂结构和演化历史的大型前陆盆地^[7],盆地四周被南海西缘断裂带、卢帕尔—武吉米辛缝合带和廷贾走滑断裂带所夹持。盆地基底较为复杂,南部钻井揭示基底由晚中生代—始

新世让拉群浅变质岩组成,是陆区锡布带在海区的延伸^[18];盆地北部基底埋深大,最大深度超过 16 km,基底情况不祥;盆地西部基底中钻遇中生代花岗闪长岩,与邻近的万安盆地一样受到中生代岩浆活动的改造。中—晚中新世,南海西缘断裂、廷贾断裂发生走滑活动,对曾母盆地、万安盆地、中建南盆地均产生重要影响。

2 南海岩石圈结构特征

2.1 地震波速度结构特征

2.1.1 地壳速度结构

南海岩石圈速度结构在横向和纵向上存在显著变化,图 2 所示的地震波速度结构柱反映了组成南海的各构造块体表现出独特的结构特征。由声呐浮标揭示的中央海盆具有大洋型岩石圈结构特征^[19],洋壳由沉积层(即大洋层 1)、层 2 和层 3 构成 3 层速度结构层,层 1 层速度为 1.5~3.6 km/s,厚度在 0.24~2.59 km,由海盆边缘向海盆内部逐渐减薄;层 2 速度在 4.3~6.4 km/s,平均值为 5.34 km/s,厚度稳定在 2 km 左右,与一般大洋和边缘海的层 2 相同;层 3 速度为 6.5~7.4 km/s,平均值为 6.93 km/s,平均厚度为 2.9 km,比一般大洋层 3(如菲律宾海盆和西北太平洋)薄 1~2 km,可能与南海洋盆形成时代较新有关。大洋层 3 之下为上地幔,其顶部速度一般为 7.7~8.30 km/s,平均值为 7.8 km/s。洋盆区地壳厚度在 4.4~7.91 km,均值为 4.9 km 左右。总的来说,靠近海盆边缘的地壳厚度大于海盆中心,岩石圈厚度为 45~55 km。磁条带对比结果表明洋盆形成于 42~35 Ma 和 32~17 Ma 的南海海底扩张^[6,19]。

双船地震(ESP)和海底地震仪(OBS)探测结果表明,南海洋盆北缘的台琼块体地壳具上下两层速度结构^[7,9-10,20-21],上地壳平均速度为 5.8 km/s,下地壳速度平均为 6.8 km/s。上地壳厚度非常薄,为 3.4~5.0 km,下地壳异常厚,达 15~19 km,东沙隆起处地壳厚度最大,达 32 km。南海北部陆缘下地壳底部发育一层厚度变化较大的异常高速层^[7,9,20],以东沙群岛附近最为发育,最大厚度可达 17 km,分别向西和向洋盆方向逐渐

减薄。异常高速层在张裂大陆边缘和陆内裂谷带均有发现,其形成可能是张裂期间深部岩浆与地壳底部产生壳幔混合作用的产物。台琼块体上地幔顶部速度在 7.6~8.33 km/s 之间,平均为 8.14 km/s。

ESP 资料反映洋盆西缘的中西沙块体地壳速度具两层结构特征,上地壳层速度在 5.7~6.02 km/s 之间,平均为 6.0 km/s,厚度为 16 km;下地壳层速度平均为 6.6 km/s,厚度为 6 km,上地壳厚度是下地壳厚度的两倍多,明显不同于台琼块体上地壳薄、下地壳厚的特点。西沙群岛西永 1 井资料揭示数百米厚的新生代薄层沉积之下即为前寒武纪基底,巨厚的上地壳层可能代表了厚度较大的元古宙变质基底。中西沙块体上地幔顶部速度为 8.3±0.2 km/s,莫霍面埋深为 24 km。

南沙块体的地壳结构十分复杂,曾母盆地东北部地区声呐浮标获得的速度结构表明,除沉积层外的上地壳平均速度为 5.1 km/s,厚度为 3 km 左右^[22],未完全揭示的部分下地壳平均速度为 6.73 km/s,该速度介于花岗岩(6.3 km/s)与玄武岩(7.1 km/s)之间,类似于无花岗岩型盆地的地壳结构特征^[23],可能反映了曾母盆地局部地区缺失花岗岩地壳层。

2.1.2 壳幔速度结构

一般的深地震测深只能揭示莫霍面附近及其以上的地壳结构,对于莫霍面以下的壳幔结构通常借助于天然地震波层析成像结果。图 3 是沿不同纬度方向穿过南海的天然地震体波层析成像剖面图,剖面深度达 400 km,在莫霍面以下的上地幔与地壳结构一样具有成层性,由 3 层速度结构组成,即上地幔盖层(相当于岩石圈地幔,纵波速度在 7.9~8.3 km/s)、软流层和过渡层组成。上地幔盖层位于莫霍面与地幔低速层顶面之间,在不同位置厚度变化较大,侧向上速度变化亦较大。图 3-A 沿 19°N 方向展布,该剖面自西向东穿过莺歌海盆地、海南岛、琼东南盆地、珠江口盆地南缘、南海中央海盆,向东延伸到吕宋岛,进入菲律宾海盆。海南岛位于上地幔软流层向上隆起部位,莺歌海盆地位于隆起的斜坡上,地幔盖层出现强烈减薄,速度大于 8.1 km/s 的高速层连续性在海南岛处中断。图 3-B 沿 14°N 方向展布,剖面穿过印支板块、南海西缘断裂中建南盆地、南海洋盆主体,到达菲律宾岛弧区。印支区存在一个地幔隆起,地幔盖层减薄程度非常大,软流层顶面埋深异常浅,深度仅约 50 km。中建南盆地正位于地幔盖层厚度剧烈变化带上,软流层出现向上隆起,速度大于 8.1 km/s 的高速层的连续性在这里中断,莫霍面也呈向上抬升之势。图 3-C 沿 5°N 方向展布,自西向东穿过巽他陆架、曾母盆地北部、婆罗洲增生系、沙巴和苏禄海。婆罗洲增生系和沙巴地区正处于地幔隆起之上,岩石圈厚度仅 45~50 km,曾母盆地位于隆起斜坡带上。

在平面上,上地幔盖层和软流层存在明显的东西分带性,大致呈北西向带状展布,分界位置沿印支半岛北部北西向构造带往南海海区延伸方向上,直至婆罗洲东南部,形成一条规模宏大的上地幔隆起带(图 4)。以此为界,上地幔盖层在南海东北部及华南地区厚度较大,软流层相对较薄,而印

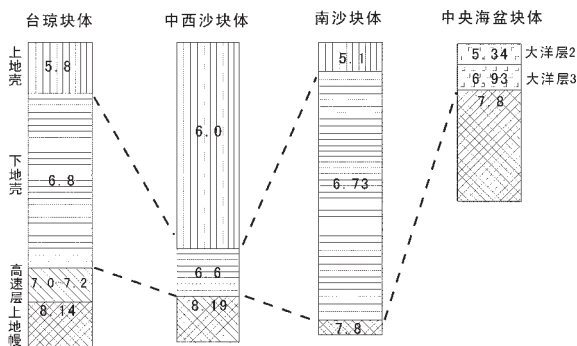


图 2 南海不同构造单元地震波速度(km/s)结构图

Fig.2 Seismic wave velocity structures of different tectonic units of the South China Sea

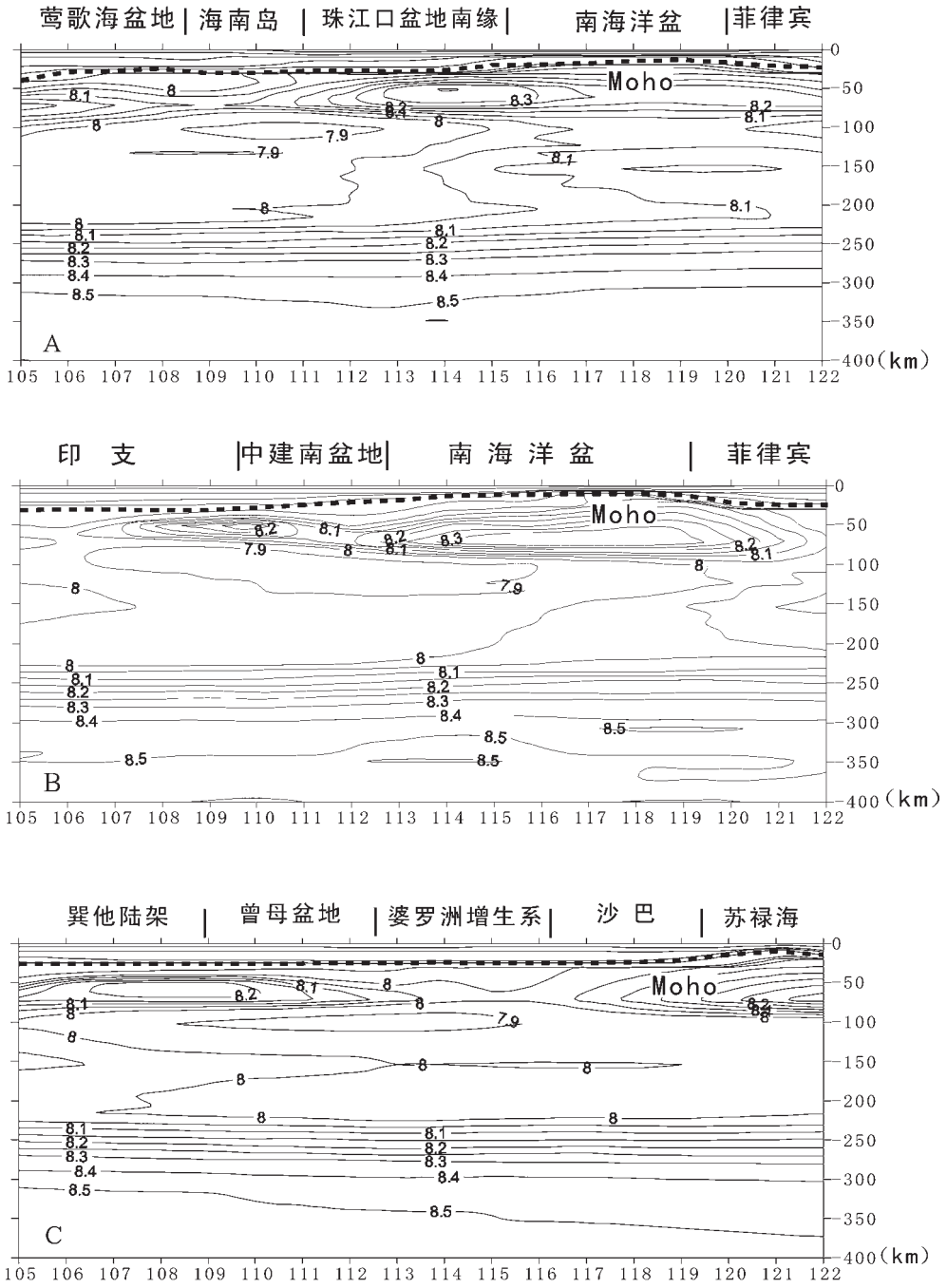


图 3 南海地震波层析成像剖面图

(剖面位置:A:19°N,B:14°N,C:5°N;单位:km/s)

Fig.3 Seismic topographic sections along different latitudes of the South China Sea

(Location of sections: A: 9°N, B: 14°N, C: 5°N. Unit: km/s)

支和南海西部海域至沙巴地区软流层十分发育,二者在空间上呈现为互为消长的结构特征,即地幔盖层厚度小的地方软流层相当发育,如印支半岛中南部和婆罗洲地区。显然,软流层的上涌造成了地幔盖层的减薄,甚至整个地幔盖层的连续

性被破坏,并产生强烈而广泛的岩浆活动。上新世—第四纪期间,海南岛、印支半岛中南部以及南沙中北部地区出现的大规模玄武质岩浆喷发应当与此有关。软流层隆起带由几个上隆中心组成,在南海西北部以海南岛为中心,软流层最浅

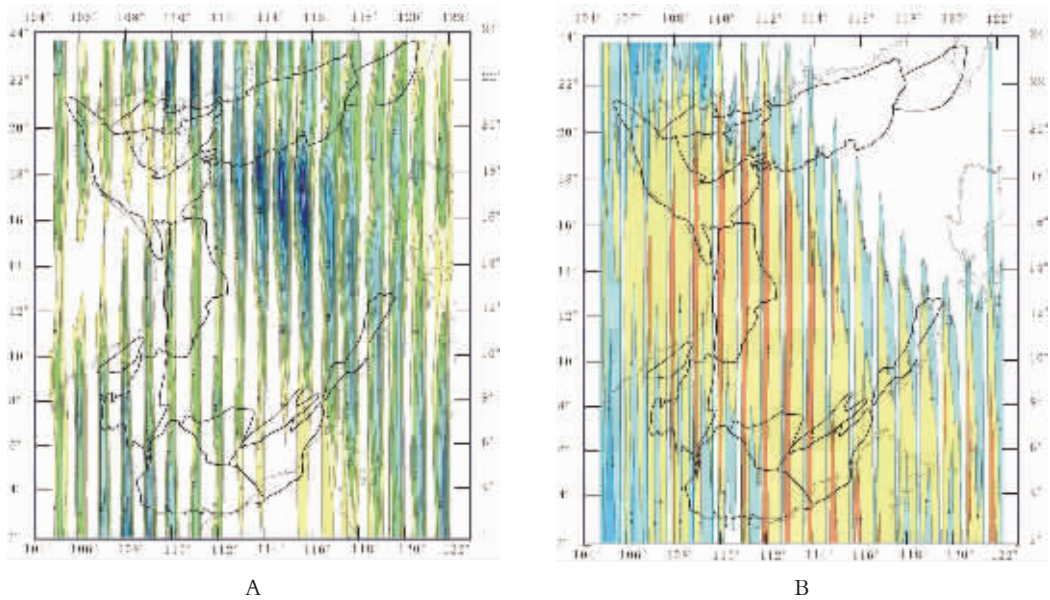


图4 南海地幔盖层(A)和软流层(B)平面图
(蓝色代表相对高速层,橙色代表相对低速层;盆地名称参照图1)

Fig.4 Sections of the upper mantle lid(A)and asthenosphere (B)in the South China Sea

(The blue color stands for the relatively high-velocity layer and the orange stands for the relatively low-velocity layer; see Fig. 1 for the basin names)

处理深仅 60 km,在南海南部以婆罗洲的沙巴为中心。围绕这些隆起中心,在其隆起斜坡上发育了莺歌海盆地、琼东南盆地、中建南盆地、万安盆地、北康盆地、曾母盆地、文莱—沙巴盆地等多个大型的含油气盆地。

2.2 莫霍面与地壳厚度

南海莫霍面总的特征是自周缘陆区向海盆内呈向上抬升趋势(图5),莫霍面深度从 30 km 左右减薄至洋盆区不足 10 km,但其间莫霍面起伏变化特征有明显差异。在南海北部的珠江口盆地和台西南盆地,莫霍面自陆缘向洋盆方向逐渐抬升,在邻近中央海盆的坳陷内莫霍面凸起幅度加大。位于南海西部的莺歌海盆地、琼东南盆地、中建南盆地、万安盆地和曾母盆地沉积中心部位莫霍面向上强烈凸起,等值线延伸方向与沉积等厚线方向一致,表明莫霍面深部隆起对盆地坳陷以及坳陷内沉积的控制作用,尤其以莺歌海、中建南和曾母盆地表现最为显著,地壳厚度减薄至 12~14 km,若扣除新生代沉积厚度,则莺歌海和中建南盆地地壳仅数千米厚,而曾母盆地莫霍面隆起最高处沉积层几乎直接覆盖在上地幔之上。

2.3 热岩石圈厚度

采用干玄武岩固相线确定热岩石圈底界的方法获得了南海热岩石圈厚度(图6),南海的热岩石圈厚度等值线方向以 NW、NE 和 SN 向为主,变化幅度很大,印支半岛南部、海南岛等陆区和西沙、中沙以及南沙岛礁区对应较大的岩石圈

厚度,陆缘带上各沉积盆地则位于岩石圈减薄带上或岩石圈隆起区,尤其是莺歌海盆地、曾母盆地和中建南盆地,盆地内大部分地区岩石圈厚度小于 40 km,是除南海洋盆区外热岩石圈厚度最薄的地区。

总体来看,南海的岩石圈速度结构存在显著的侧向变化,地壳厚度与岩石圈厚度的侧向变化也相当明显,上地幔普遍隆起,岩石圈底界深度较浅,南海及其邻区的天然地震 S 波资料也同样揭示了类似特征^[8,11,26]。

3 南海油气资源的分布特征

南海是东南亚地区具有极好油气远景的地区,是继波斯湾、北海和墨西哥湾之后世界四大海洋油气聚集中心之一。据不完全统计,目前南海已发现各类油田 107 个,气田 162 个,分布在南海北部、西部和南部陆缘的新生代沉积盆地中(图7),估计石油资源量达 230~300 亿 t。从现今已发现的油气田分布看,油田主要分布在邻近陆缘的陆架区,如北部湾盆地、珠江口盆地珠一坳陷、涠公盆地、曾母盆地东巴林坳陷、文莱—沙巴盆地。油田规模不大,一般为中小型油田。气田则集中分布在南海西部陆缘和陆坡深水区,大多规模巨大,且具有成区成带分布特征,形成南海西部天然气聚集区带、南海北部油气聚集区带和南海南部油气聚集区带^[27-28]。

3.1 南海西部天然气聚集区带

南海西部天然气聚集区带沿红河断裂带、南海西缘断

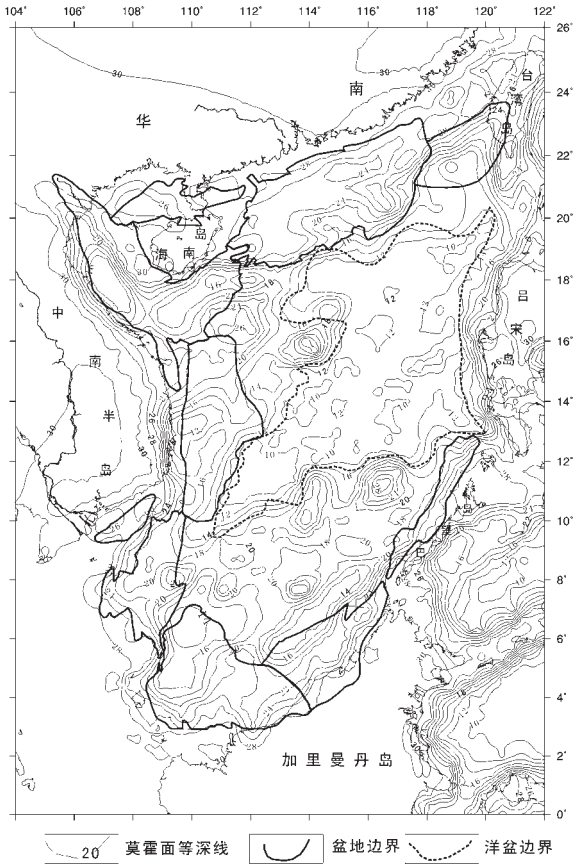


图 5 南海莫霍面深度(km)图^[24]

Fig.5 Moho depth of the South China Sea(unit: km)

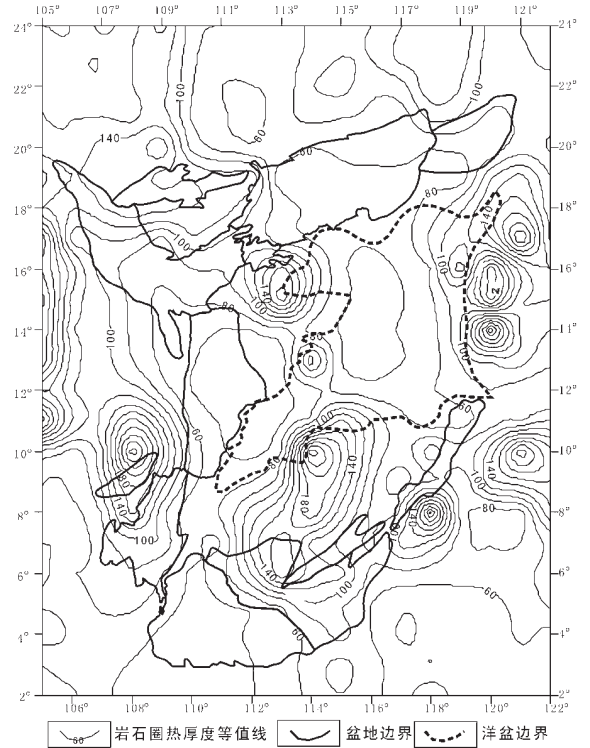


图 6 南海热岩石圈厚度(km)图
(岩石圈厚度图据^[25])

Fig.6 Thickness of the thermal lithosphere beneath the South China Sea
(unit: km; lithospheric thickness map based on^[25])

裂带、廷贾断裂带和卢帕尔—武吉米辛断裂带分布,天然气主要赋存在莺琼盆地、曾母盆地、万安盆地和北部湾盆地内,大中型气田和气藏在这一地区成区、成带分布,形成一条规模巨大的以产气为主,产油为辅的油气聚集区带,所蕴含的油气资源量占南海总资源量的 70%以上。

3.1.1 莺琼盆地油气分布特征

莺琼盆地位于印支板块与华南板块之间的缝合带之上,是南海西北部一个大型的富气盆地,迄今为止已发现数个大中型气田(崖 13-1、东方 1-1、乐东 15-1、乐东 22-1 气田),盆地内天然气资源量达 22 390×10⁸ m³ [29]。莺歌海盆地的天然气产自盆地内坳陷轴部中央拱背斜带,泥底辟上拱形成了一系列张性正断层,为深层天然气向上运移提供了通道。产气层主要为中新统—上新统莺黄组砂岩,主力烃源岩为中统梅山组和莺黄组浅海相暗色泥岩。据地球化学分析,天然气成分具有混源特征,包含来自壳源与幔源的有机与无机成因气^[30]。琼东南盆地目前仅发现的崖 13-1 气田,是中国近海大陆架上发现的第一个大气田,探明天然气地质储量 884.96 亿 m³,凝析油储量 376.9 万 t。该气田位于莺歌海盆地与琼东南盆地交界处的崖 13-1 基底隆起带上,其西缘为

北西向的 I 号断裂,气田主要储集层为上渐新统陵水组三段砂岩,其次为陵水组二段和三亚组一段砂岩。根据地球化学分析,崖 13-1 气田气源来自西面莺歌海盆地梅山组和东侧琼东南盆地崖南凹陷崖城组^[31],这套地层为海陆过渡环境的滨浅海及海岸平原沼泽相沉积,有机碳含量较高,以 III 型干酪根为主,在距今 0.23 Ma 进入高成熟阶段^[32]。

3.1.2 万安盆地油气分布特征

万安盆地位于印支板块边缘,是一个油气兼备,以含气为主的盆地,已发现 6 个气田(红兰花、西兰花等)和 5 个油田或油气田(大熊、兰龙、飞马等)。万安盆地的油气主要分布在北部隆起、北部坳陷南缘以及中部坳陷内,以同时产出油气为特征,中部隆起和西部坳陷主要含气,总体呈现北油南气的分布特点。主力产层为上渐新统—中新统砂岩,中—上中新统碳酸盐岩和前新近系基岩。万安盆地主要烃源岩为渐新统滨海相煤层和含煤泥岩^[33],盆地模拟和含油气系统分析表明,生烃高峰期为晚中新世,其次为早中新世,目前仍处于生油期^[34-35]。大熊油田是万安盆地目前勘探程度最高的油田,年产量 100 万 t 左右,石油可采储量为 560~7000 万桶,伴生天然气可采储量达 283~850 亿 m³。兰龙油田是另一个大型油气田,石油储量

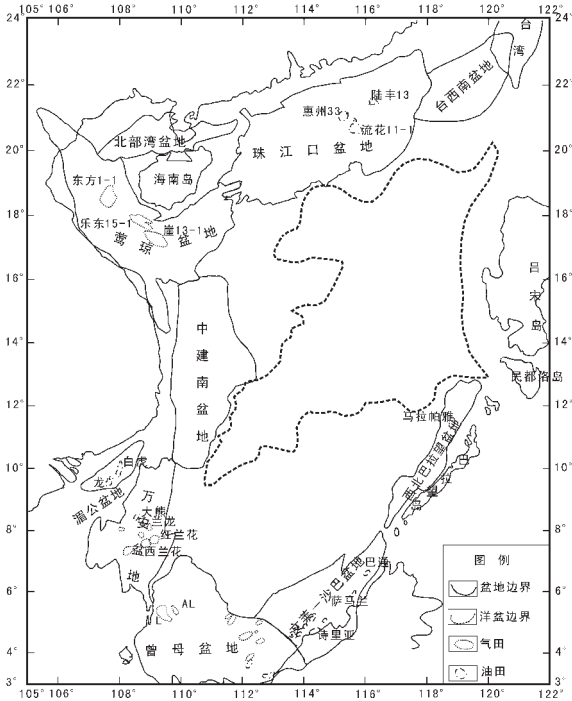


图7 南海油气田分布图

Fig.7 Distribution of oil-gas fields in the South China Sea

为6亿桶,伴生大量天然气,其储量可达283亿m³。

3.1.3 曾母盆地油气分布特征

曾母盆地位于南沙块体之上,是一个以含气为主兼产少量石油的盆地,仅陆架区业已发现40多个大中型气田(纳土纳、金坛、F6气田等)和10多个中小型油田,气田主要分布在盆地东北部的南康台地和盆地西部斜坡带,油田位于东巴林坳陷和西巴林隆起。盆地西部的纳土纳气田是曾母盆地发现的最大气田,该气田发现于1973年,储量约6.29万亿m³,其中烃类储量达1.34万亿m³[36],属世界级巨型气田。曾母盆地西部的气田普遍含CO₂,天然气组分中CO₂含量大于70%,有些气田含量高达95%,其来源既有有机成因贡献,又有无机成因的因素。近年来在曾母盆地深水区不断获得重大油气发现,预示着良好的油气前景。

曾母盆地烃源岩主要为渐新统、下中新统—中新统海陆交互相碳质页岩、煤层和海相泥岩,有机质类型为II-III型[36-37]。储集层主要为渐新统—中新统砂岩和中—上新统灰岩或礁灰岩,前述纳土纳气田和南康台地上的气田大多为礁灰岩储层。

3.2 南海北部油气聚集区带

南海北部油气主要赋存在南海北部张裂陆缘上的珠江口盆地内,大型油气田少,中小型油气田多[38],目前以产油为主,油气田主要分布在珠一坳陷,至2002年底,盆地内共发现油气田26个,年产原油逾千万吨,其油气产量居中国近海

油田第一位。珠江口盆地目前以产油为主,主力烃源岩为古近系文昌组湖相泥岩,其次为恩平组,油层主要赋存在上渐新统珠海组和下中新统珠江组下部三角洲前缘、滨岸相砂岩和韩江组三角洲砂岩以及珠江组上部碳酸盐岩中。目前在珠三坳陷和珠二坳陷北部斜坡带上发现天然气藏[39],预示良好的天然气勘探前景。

3.3 南海南部油气聚集区带

南海南部油气在文莱—沙巴盆地、西北巴拉望盆地中富集。文莱—沙巴盆地共有油田24个,气田10个,以产油为主,气田规模较小,多为石油伴生气,且分布在远离陆缘的外带。盆地内油田分布在东巴兰三角洲以及沙巴内带和外带,其中内带占了当地石油的40%和可采石油的31%。2002年,文莱探明石油储量为1.836亿t,天然气储量为3900亿m³;2002年,文莱原油产量为0.0918亿t,天然气产量为111亿m³。近年来在深水区块以天然气为目标进行了一系列勘探,获得重大发现。文莱—沙巴盆地含油气层为中中新统—上新统砂岩,烃源岩为下中新统—中新统页岩。

西北巴拉望盆地油气田沿盆地东南边缘分布,油田大致分布在100m水深线以内,规模非常小,产量低,目前大多数已经停产。近年在巴拉望近海深水区有重大发现,在水深864m处发现马拉帕雅(Malampaya)气田,在水深350m处发现Linapacan气田。

4 讨论

南海是东南亚的一个油气富集区,尤其是西部海域集中了南海绝大部分的大中型气田,形成一条规模宏大的以产气为主,产油为辅的油气聚集区带。为何南海西部海域油气如此丰富?油气勘探理论认为,油气的富集和分布与其所赋存的沉积盆地的发育密切相关,而沉积盆地的形成直接受岩石圈结构与变形的影响。对世界范围内大型富油气盆地的研究表明,大型油气田的形成与莫霍面的形态与油气富集有密切的关系,凡是油气富集的盆地莫霍面必然呈上隆状态[2],发育大型油气田的张裂型盆地上地幔往往表现为低速异常,如渤海湾盆地[40]。

对南海的岩石圈结构研究表明,南海的岩石圈具有显著的不均匀性,横向上被岩石圈断裂分割成具差异性速度结构的构造块体[41],并由海盆周缘减薄型大陆岩石圈向海盆中央变为大洋型岩石圈。在纵向上,南海岩石圈具有分层结构特征,由地壳层、地幔盖层、软流层和过渡层组成,地幔盖层与软流层厚度侧向上变化较大,二者之间呈互为消长关系。南海西部盆地莫霍面明显向上隆起,与盆地基底呈镜像对应,热岩石圈厚度也显著减薄,盆地总体上位于一条北西向的上地幔隆起带上。

南海岩石圈复杂结构的形成与其处在欧亚板块、太平洋板块与印度—澳大利亚板块相互作用的大南海构造背景有关[42]。中生代期间受到强烈的构造运动与构造变形的

影响。中生代末,俯冲的太平洋板块相对欧亚大陆的运动方向发生改变并向远离欧亚大陆方向后撤^[43-44],中国东南陆缘的构造应力场从区域性挤压变为拉张,活动大陆边缘性质发生转变,形成北北东-北东向的陆缘裂谷地堑,成为后期沉积盆地发育的雏形。65 Ma,印度板块与欧亚板块之间发生初始接触碰撞,到43 Ma时,两大板块发生全面碰撞,青藏高原强烈隆升,印度板块向北插入欧亚板块之下,其结果之一是造成青藏地区岩石圈厚度增大和印支板块向东南方向挤出^[45],作为华南板块和印支板块边界的红河断裂成为印支板块滑移的北部边界;结果之二是印度板块的地壳进入欧亚板块的地幔之中,驱动了地幔软流层的侧向流动,地幔流优先选择早期存在的构造薄弱带流动,因此,西藏东南部至南海之间的红河断裂成为东南方向地幔流通道,东南亚陆区的P波层析成像很好地揭示了这一条规模宏大的北西向地幔低速异常带^[46],这条低速通道一直往东南延伸进入南海,正好与前面描述的南海北西向上地幔低速隆起带相接。地幔流促进了一系列先存断裂的重新活动,造成南海地区岩石圈的减薄和张裂作用的发生,在南海西部的地壳伸展程度远大于东部地区^[47],沿红河断裂、南海西缘断裂、卢帕尔—武吉米辛断裂和廷贾断裂附近的沉积盆地也发生快速的伸展裂陷,具有较高的沉降速率,发育了巨厚的新生代沉积,莺歌海盆地最大沉积厚度超过14 000 m;万安盆地最大厚度达12 000 m;曾母盆地康西坳陷最大沉积厚度超过16 000 m^[48],巨厚的沉积为油气的生成和聚集提供了物质保障。另一方面,地幔流在移动过程中在局部地区改变流动方向,出现岩浆喷溢,如晚中新世—第四纪在海南岛、婆罗洲、印支北部发生大规模的基性岩浆喷发,在南海西部海区也形成大量火山岛或海山。断裂活动和岩浆作用使得南海西部地区成为一个热流高值带,如莺歌海盆地平均热流值达 $79 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,地温梯度达 $46^\circ\text{C}/\text{km}$,明显高于世界上大陆边缘盆地地温梯度;曾母盆地西北部廷贾断裂带附近热流值甚至高达 $100\sim 140 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。活跃的热活动一方面扩大了有效烃源岩的范围,另一方面加速了有机质生烃演化,使更多的新生代沉积在非常短的时间内能够迅速转化为烃类,提前进入生气阶段,从而造成南海西部形成以富集天然气为特征的气聚集区带。

岩石圈断裂作为物质和能量交换、运移的通道,有利于深部包含烃类的气/液流体向上运移和聚集,从而扩大烃类来源。沿南海西缘断裂带发现的气田普遍含 CO_2 ,如曾母盆地西部 CO_2 含量大于70%,最高甚至达到95%^[49];万安盆地内也钻遇含量高达80%的气柱^[49],据有关报道,最近国外石油公司在中建南盆地南部的钻井也钻到大量 CO_2 。对 CO_2 气体组分和同位素分析表明^[50-51],中国东部、南海北部陆缘的珠江口盆地、陆上的三水盆地中 CO_2 主要来源于地幔,与新生代岩浆活动密切相关,莺歌海盆地中的 CO_2 属壳幔混合成因。IGCP项目开展了太平洋和特提斯大陆边缘以及板内 CO_2 来源研究^[2],发现中国陆内 CO_2 往往沿活动断裂广泛分布,部分来源于地幔,部分源于碳酸盐岩的变质作用。因此,南海西部天然气中

高含量的 CO_2 极可能以南海西缘断裂为通道,由地幔流的上涌所产生,而南海西部油气可能具有多元化成因。

致谢:本文中地震层析成像结果由成都理工大学朱介寿教授计算。

参考文献(References):

- [1] 金之均,殷进垠,谢方克,等.盆地岩石圈结构与油气成藏及分布[J].地质科学,2003,38(3):413~424.
Jin Zhijun, Yin Jinyin, Xie Fangke, et al. Lithosphere structures and petroleum accumulation and distribution in petroliferous basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2003,38(3):413~424 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邵学钟,张家茹,殷秀华.油气勘探与地壳深部构造研究[J].石油勘探与开发,1999,26(2):11~14.
Shao Xuezhong, Zhang Jiaru, Yin Xiuhua. Petroleum exploration and study on the deep crust structure [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2):11~14 (in Chinese with English abstract).
- [3] Гавриов В П. 岩石圈中油气形成的地球动力学模式及其后果[J].海洋石油,2000,(1):63~70.
Gavriov V P. Dynamic model of petroleum formation and its results in lithosphere [J]. Marine Petroleum, 2000, (1):63~70.
- [4] Ludwig W J, Kumar N, Houtz R E. Profiler-sonobuoy measurements in the South China Sea[J]. JGR, 1979,84(B7):3505~3518.
- [5] 何廉声,姚伯初.南海北部大陆边缘上的声纳浮标测量(二)—陆缘地壳结构构造[J].海洋地质与第四纪地质,1983,3(4):57~68.
He Liansheng, Yao Bochu. Sonobuoy measurements on the margin of the northern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983,3(4):57~68 (in Chinese with English abstract).
- [6] 姚伯初,曾维军, Hayes D E, et al.中美联合调研南海地质专报[M].武汉:中国地质大学出版社,1994.
Yao Bochu, Zeng Weijun, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA [M]. Wahan: China University of Geoscience Press, 1994 (in Chinese with English abstract).
- [7] 姚伯初.南海北部陆缘的地壳结构及构造意义[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(2):1~16.
Yao Bochu. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998,18 (2):1~16 (in Chinese with English abstract).
- [8] Cao XL, Zhu JH, Zhao LF, et al. Three dimensional shear wave velocity structure of crust and upper mantle in South China Sea and its adjacent regions by surface waveform inversion [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23 (2):117~128.
- [9] Yan P, Zhou D, Liu Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea [J]. Tectonophysics, 2001, 338(1-4):1~21.
- [10] Qiu X, et al. Crustal structure across the Xisha trough, northwestern South China Sea [J]. Tectonophysics, 2001, 341(1-4):

- 179~193.
- [11] Wu Hsinhung, Tsai Yiben, Lee Tungyi, et al. 3-D shear wave velocity structure of the crust and upper mantle in South China Sea and its surrounding regions by surface wave dispersion analysis [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25(1-2):5~27.
- [12] 万玲, 吴能友, 姚伯初, 等. 南海海域地壳结构特征[A]. 见: 南海地质研究(十六)[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.1~9.
Wan Ling, Wu Nengyou, Yao Bochu, et al. Crustal structure in Nansha and its adjacent area [A]. In: *Geological Research of South China Sea(memoir 16)*[C]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2005. 1~9(in Chinese with English abstract).
- [13] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 南海岩石圈三维速度结构特征[J]. *地质通报*, 2005,24(1):1~8.
Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. The tectonic history and it's velocity structure of the lithosphere of the South China Sea [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2005,24 (1):1~8 (in Chinese with English abstract).
- [14] 万玲, 姚伯初, 吴能友. 南海西部海域新生代地质构造特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005,25(2):45~52.
Wan Ling, Yao Bochu, Wu Nengyou. Cenozoic Geological Characteristics in the West of the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005,(25)2: 45~52 (in Chinese with English abstract).
- [15] 万玲. 南海及周围地质构造特征[A]. 见: 我国专属经济区和大陆架勘测专项综合报告[C]. 北京: 海洋出版社, 2002.184~198.
Wan Ling. Geological and tectonic characteristics of the South China Sea and adjacent areas [A]. In: *Synthetic Report on the Special Economic Zone and Continental Shelf Survey*[C]. Beijing: Oceanic Press, 2002. 184~198(in Chinese).
- [16] 万玲. 南海及邻域构造演化[A]. 见: 海洋地质地球物理补充调查及矿产资源评价[C]. 北京: 海洋出版社, 2004.246~253.
Wan Ling. Tectonic evolution of the South China Sea and its adjacent areas [A]. In: *Geological and Geophysical Complimentary Survey and Evaluation on Mineral Resources* [C]. Beijing: Oceanic Press, 2004.246~253(in Chinese).
- [17] 吴进民. 南沙海域万安、曾母盆地的区域构造 [J]. *海洋地质*, 1997,(4):1~15.
Wu Jinmin. Regional structures of Wan'an and Zengmu Basins in Nansha area [J]. *Marine Geology*, 1997,(4):1~15(in Chinese).
- [18] Charles S. Hutchison. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo [A]. In: Hall, R. & Blundell, D. (eds), *Tectonic Evolution of Southeast Asia* [C]. Geological Society Special Publication, No.106m, 1996,247~261.
- [19] Brian Taylor, Denis Hayes, Origin and history of the South China Sea Basin [A]. In: Hayes. D E (ed.). "The tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands" Part 2 [C]. *Geophysical Monograph* 27, 1983,23~56.
- [20] Dennis E. Hayes, Susan Spangler Nissen, et al. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in the crustal extension [J]. *JGR*, 1995,100,(B11): 22435~22 446.
- [21] Nakamura Y, McIntosh K, Chen A T. Preliminary results of a large offset seismic survey west of Hengchun Peninsula, Southern Taiwan [J]. *TAO*, 1998,9(3):395~408.
- [22] Houtz R E, Hayes D E. Seismic refraction data from Sunda Shelf [J]. *AAPG*, 1984,68(12):1870~1878.
- [23] 张景廉, 吕锡敏, 关银录, 等. 地壳新的地球物理模型与石油的无机成因说[J]. *地球物理学进展*, 1997,12(4):91~97.
Zhang Jinglian, Lu Ximin, Guan Yinlu, et al. New model for the crust and inorganic origin theory of petroleum [J]. *Progress in Geophysics*, 1997,12(4):91~97(in Chinese with English abstract).
- [24] 苏达权. 海洋地质地球物理补充调查及矿产资源评价 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004.132.
Su Daquan. *Geological and Geophysical Complimentary Survey and Evaluation on Mineral Resources* [M]. Beijing: Oceanic Press, 2004.132. (in Chinese).
- [25] 姚伯初, 万玲, 曾维军, 等. 南中国海岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Yao Bochu, Wan Ling, Zeng Weijun, et al. 3-D Lithosphere Structures and Evolution of the South China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).
- [26] Sergei Lebedev and Guust Nolet. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography [J]. *JGR*, 2003,108(B1,ESE):21-1-26.
- [27] 万玲, 姚伯初, 吴能友, 等. 南海西部海域天然气聚集区带地质特征及深部动力学探讨 [A]. In: 中国地球物理学会会刊[C]. 2005,304.
Wan Ling, Yao Bochu, Wu Nengyou, et al. Geological characteristics of natural gas accumulation zone and its deep dynamics in the western South China Sea [A]. In: *The 21th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society Abstracts* [C], 2005.304.
- [28] 万玲. 南海油气资源的时空分布[A]. 见: 李家彪主编, 中国边缘海形成演化与资源效应[C]. 北京: 海洋出版社, 2005.434~446.
Wan Ling. Petroleum resources distribution in the South China Sea [A]. In: Li Jiabiao (ed.). *Evolution of China's Marginal Seas and Its Effect of Natural Resources* [C]. Beijing: Oceanic Press, 2005. 434~446(in Chinese).
- [29] 戴金星. 天然气地质和地球化学论文集(卷二)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.6.
Dai Jinxin. *Natural Gas Geology and Geochemistry in China (Volume II)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.6 (in Chinese).
- [30] 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等. 中国东部陆上和海域 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素分析[J]. *中国地质*, 2005,32 (4):663~673.
He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, et al. Analysis of the genesis and migration and accumulation of CO₂ and controlling factors in the onland and offshore areas of eastern China [J]. *Geology in China*, 2005,32(4): 663~673 (in Chinese with English abstract).
- [31] 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源[M]. 科学出版

- 社, 2004.143.
- Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning, et al. Large gas fields and their origin in China [M]. Beijing: Science Press, 2004.143(in Chinese).
- [32] 张启明, 郝芳. 莺琼盆地演化与含油气系统 [J]. 中国科学(D), 1997,27(2):149~154.
- Zhang Qiming, Hao Fang. Evolution, petroleum systems of Ying-Qiong basin [J]. Science in China (Series D), 1997,27(2):149~154 (in Chinese).
- [33] Matthews S J, Fraser A J, Lowe S, et al. Structure, stratigraphy and petroleum geology of the SE Nam Con Son Basin, offshore Vietnam [A]. Petroleum Geology of Southeast Asia [C]. Geological Society Special Publication, 1997, No.126:89~106.
- [34] 刘振湖, 陈强. 南海万安盆地油气生成演化预测—低勘探程度的盆地模拟 [A]. 见: 南海地质研究(十) [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.34~46.
- Liu Zhenhu, Chen Qiang. Prediction of hydrocarbon generation and evolution in Wan'an basin, South China Sea—Simulation on a low explored basin [A]. In: Geological Research of South China Sea [Menoir 10] [C]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1998.34~46(in Chinese with English abstract).
- [35] 刘振湖, 姚伯初. 万安盆地新生代地层热成熟度史研究 [A]. 南海地质研究(6) [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.70~79.
- Liu Zhenhu, Yao Bochu. Thermal maturity of Cenozoic in Wan'an basin, South China Sea [A]. In: Geological Research of South China Sea [Menoir 6] [C]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1994.70~79(in Chinese with English abstract).
- [36] 郑之逊. 南海南部海域第三系沉积盆地石油地质概况 [J]. 国外海上油气, 1993,(3):132.
- Zheng Zhixun. Petroleum geology of Tertiary sedimentary basins in southern area of the South China Sea [J]. Offshore Petroleum Abroad. 1993,(3):132(in Chinese).
- [37] Todd S P, et al. Characterizing petroleum charge systems in the Tertiary of SE Asian [A]. In: Frazer A J, Matthews S J, Murphy R W (eds). Petroleum Geology of Southeast Asia [C]. Geological Society Special Publication, 1997, No.126: 25~47.
- [38] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004,29(5):543~549.
- Yao Bochu, Wan Ling, Liu Zhenhu. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004,29(5):543~549(in Chinese with English abstract).
- [39] 林兴荣, 孙志鹏. 文昌 A 天然气成藏地质条件 [J]. 天然气工业, 1999,19(1):47~51.
- Lin Xingrong, Sun Zhipeng. Zhusan Depression Wenchang A gas oil and gas formation pattern [J]. Natural Gas Industry, 1999,19(1): 47~51(in Chinese with English abstract).
- [40] 宋晓东, 李思田, 李迎春, 等. 岩石圈地幔结构及其对中国大型盆地的演化意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004,29(5):531~538.
- Song Xiaodong, Li Sitian, Li Yingchun, et al. Structure of lithosphere mantle and its implications for the evolution of major basins in China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004,29(5):531~538(in Chinese with English abstract).
- [41] 刘海龄, 阎贫, 孙岩, 等. 南沙微板块的层块构造 [J]. 中国地质, 2002,29(4):374~381.
- Liu Hailing, Yan pin, Sun Yan, et al. Layer-block tectonics of the Nansha microplate [J]. Geology in China, 2002,29(4): 374~381(in Chinese with English abstract).
- [42] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动 [J]. 中国地质, 2004,31(2):113~122.
- Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area [J]. Geology in China, 2004,31(2):113~122(in Chinese with English abstract).
- [43] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific Plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. Geology, 1995, 23(8):719~722.
- [44] Holloway N H. North Palawan block, Philippines — its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea [J]. AAPG., 1982, 66(9):1355~1383.
- [45] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982,10(12):611~616.
- [46] Liu Mian, Ciu Xiaojun, Liu Futian. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. Tectonophysics, 2004, 393:29~42.
- [47] Hayes DE. Margins of the southwest sub-basin of the South China Sea—a frontier exploration target? [J]. Energy, 1985, 10 (3/4):373~382.
- [48] 吴庐山, 邱燕, 解习农, 等. 南海西南部曾母盆地早中新世以来沉降史分析 [J]. 中国地质, 2005,32(3):370~377.
- Wu Lushan, Qiu Yan, Xue Xinong, et al. Analysis of the subsidence history of the Zengmu basin in the southwest South China Sea since the early Miocene [J]. Geology in China, 2005,32(3):370~377(in Chinese with English abstract).
- [49] 刘宝明, 夏斌, 李绪宣, 等. 中国东部及南海西部陆缘 CO₂ 形成机理 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004,23(3):207~212.
- Liu Baoming, Xia Bin, Li Xuxuan, et al. The genetic mechanism of CO₂ in the east China and southwestern China Sea [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004,23(3):207~212 (in Chinese with English abstract).
- [50] 王振峰, 何家雄, 裴秋波. 莺琼盆地和珠江口盆地西部 CO₂ 成因及运聚分布特征 [J]. 中国海上油气(地质), 2003,17(5):293~297.
- Wang Zhenfeng, He Jiaxiong, Pei Qiubo. The origin and migration accumulation features of CO₂ in Ying-Qiong basin and the western part of Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003,17(5):293~297 (in Chinese with English Abstract).

- [51] 何家雄,夏斌,王志欣,等.中国东部陆相断陷盆地及近海陆架盆地 CO₂ 成因判识与运聚规律研究 [J]. 中国海上油气, 2005,17(3): 153~161.
He Jiaxiong, Xia Bin, Wang Zhixin, et al. CO₂ origin identification and its migration and accumulation research in eastern China rifted basins and shelf basins [J]. China Offshore Oil and Gas. 2005,17(3): 153~161(in Chinese with English abstract).
- [52] Yuan Daoxian. Part I Progress of IGCP 379 In 1998 and Meeting Plan in 1999.

Lithospheric structure and petroleum distribution in the South China Sea

WAN Ling^{1,2}, YAO Bo-chu², ZENG Wei-jun², WU Neng-you², XIA Bin¹, ZHU Ben-duo²

(1. *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China*)

Abstract: The South China Sea is one of the four major marine petroleum accumulation centers in the world and also China's only marginal sea where oceanic crust is developed. Petroleum exploration shows that petroleum fields in the South China Sea are distributed in the northern, western and southern continental-margin sedimentary basins and that large- and medium-sized petroleum fields are concentrated in basins of the western sea area. These basins are from north to south the Yinggehai-Qiongdongnan basin, Wan'an basin, Meigong basin, Zengmu basin and Brunei-Sabah basin. They contain mainly gas and subordinately oil. Moreover, there are several large potential petroleum-bearing basins in deep-water areas of the region. Further studies indicate that the petroleum distribution of the South China Sea has close relationship with the deep lithospheric structure. Tectonically, the petroleum-bearing basins in the South China Sea are located on or at the edges of the lithospheric blocks, controlled by the development and evolution of large lithospheric faults. The Moho surfaces in these basins are uplifted remarkably and form mirror images of the basin basements. The crust of the basins is only several kilometers thick at the thinnest site, where the heat flow values are notably higher than those in their surrounding areas. The thickness of the thermal lithosphere is reduced greatly. Seismic topographic imaging shows that at depths of these basins an enormous NW-trending uplift zone of the upper mantle extends from the Red River Mouth southeastward through the southwest sub-basin of the South China Sea to the northeast of Borneo, which macroscopically controls the petroleum distribution and accumulation of the South China Sea.

Key words: lithospheric structure; petroleum resources; South China Sea

About the first author: WAN Ling, female, born in 1969, received her PhD in structural geology at Nanjing University in 1998. Her primary interests are in regional geology, deep structure and deep-water petroleum of the South China Sea; E-mail: wanling@163.com.