

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.02121

中国近海盆地幕式构造演化及成盆类型与油气富集规律

何家雄¹, 张伟¹, 颜文¹, 卢振权², 张景茹¹, 龚晓峰¹

(1. 中国科学院 边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 中国近海盆地处在欧亚、印度-澳大利亚及太平洋三大板块相互作用之新生代最活跃区域, 古近纪以来, 经历了多期构造活动, 尤其是中新世以来的新构造运动较强烈, 在此区域地质背景的影响和制约下, 中国近海盆地构造演化具有幕式演化特征, 逐渐形成了“沟-弧-盆”系统, 在边缘海浅水及深水区形成了一系列具有断拗双层结构的不同类型的新生代盆地, 沉积充填了古近纪断陷裂谷早期中深湖相地层及其烃源岩、断陷晚期煤系地层及烃源岩、新近纪拗陷期中新统海相地层及其烃源岩, 进而为油气形成奠定了雄厚的物质基础。中国近海盆地沉降沉积中心具有由陆逐渐向深海洋盆迁移的特点, 形成了多套不同类型储盖组合, 加之与晚期新构造运动和烃源供给系统时空上相互耦合配置, 进而最终形成并控制影响了近海沉积盆地油气分布富集规律。

关键词: 幕式构造演化; 陆缘区内带与外带; 平面内油外气; 纵向油气叠置; 中国近海盆地

中图分类号: P744

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2014)02-0121-14

中国海域盆地位于欧亚板块东南缘, 主要是受控于印-澳、太平洋及欧亚三大板块相互作用所形成的伸展构造体系。古近纪以来, 逐渐形成了海沟、岛弧和边缘海, 在中国近海浅水及深水区形成了一系列不同类型的新生代盆地^[1-5]。中国海域沉积盆地共 26 个, 面积约 $160 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中中国近海主要分布有渤海盆地(渤海湾盆地海上部分)、北黄海盆地、南黄海盆地、东海盆地、台西盆地、台西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、北部湾盆地和莺歌海盆地等十几个含油气盆地, 面积约 $90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。目前油气勘探开发主要集中在近海的渤海、东海、珠江口、琼东南、莺歌海、北部湾、南黄海 7 个含油气盆地中。这些盆地已证实存在一批富烃凹陷及油气富集区带, 是中国边缘海盆地油气储量增长的主要勘探领域及有利区带。目前, 中国海域石油储量及产量, 主要集中于渤海、珠江口、北部湾盆地, 而天然气储量及产量则主要集中在莺歌海、琼东南盆地及东海盆地^[6-7]。迄今为止中国海域已勘探发现近 200 个油气田, 含油气构造 145 个, 油气总产量在 2010 年已超过 5 000 万吨油当量/年, 其中渤海盆地达

3 000 万吨油当量/年, 南海北部达 2 300 万吨油当量/年^[4]。目前南海北部边缘海盆地油气勘探正在向广阔的深水区拓展^[8-10], 预计将来在深水区的油气勘探一定会有更大的发现和重大突破。本文在以往及前人大量研究工作的基础之上, 结合中国近海沉积盆地油气勘探开发实践, 系统总结了中国近海含油气盆地幕式构造演化特征与成盆类型及其油气富集规律, 以期为中国近海沉积盆地进一步油气勘探活动及油气地质研究等提供一些借鉴和参考, 进而起到抛砖引玉之效果。

1 构造演化特征

近 30 年来的研究表明, 中国海域沉积盆地是受印-澳板块、太平洋板块及欧亚板块的发展运动及相互作用制约所形成的伸展构造体系^[11], 同时受古特提斯构造域和太平洋构造域的控制和影响, 古近纪以来, 经历了强烈的地质作用, 是新生代构造变动最活跃的区带, 尤其是中新世以来的新构造运动非常强烈, 在此区域地质背景的影响和制约下, 中国近海盆地的构造演化经历了幕式伸展裂陷作用、幕式沉降作用以及新构造运动, 逐渐形成了海沟、岛弧和边缘海, 即沟-弧-盆系统^[5], 在边缘海浅水及深水区形成了一系列不同类型的新生代盆地, 且具有独特的区域地质构造背景及油气地质特征(图 1); 其石油地质条

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176052); 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219501)

作者简介: 何家雄(1956—), 男, 研究员, 博士, 从事油气勘探与地质综合研究, E-mail: hejx@gig.ac.cn

收稿日期: 2013-05-16; 改回日期: 2013-07-29 周立君编辑

件优越,油气资源潜力大,且油气资源分布富集规律及其特点亦具有一定的规律性。



图1 中国边缘海盆地“内油外气”环带分布规律 (据邓运华,2009,修改)

Fig.1 The distribution pattern of “oil fields inside and gas fields outside” in Chinese marginal basin (modified after Deng Yunhua,2009)

1.1 早期幕式伸展裂陷作用

据龚再升,王善书、张功成等^[9-4,12]研究,中国近海沉积盆地及其邻区古近纪进入活跃的裂陷造盆期,主要发生了三幕(期)性质不同、规模不同、程度不同和地域不同的伸展张裂/裂陷作用。

1.1.1 古新世初始裂陷幕

白垩纪末古近纪初期,在南海北部边缘盆地发生了神狐运动,在东海盆地发生了雁荡运动。此次运动之后,中国海域及中国大陆东部,在前古近纪褶皱、隆起与剥蚀的基础上,发生了中国海域断陷盆地第一幕伸展张裂/裂陷作用,形成了由众多北北东-北东走向半地堑组成的断陷^[13-16],半地堑内主要充填了较厚的古新统河流相及河流沼泽相沉积。按裂陷强弱程度可分为两区:强烈裂陷区主要在渤海海域济阳拗陷和辽东湾拗陷、南黄海盆地;弱裂陷发育

区主要在南海北部湾盆地迈陈凹陷西洼、珠江口盆地北部拗陷带文昌C凹陷等,仅零星形成孤立的小型断陷^[4]。

1.1.2 始新世主裂陷幕

古新世末期及早始新世,在南海北部发生珠江运动第一幕,在东海盆地发生了瓯江运动,苏北-南黄海南部盆地及南黄海北部盆地则发生了吴堡运动。在区域抬升遭受剥蚀的基础上,中国海域及其邻区进入了第二裂陷幕(始新世主裂陷幕),发生了强烈的伸展张裂/裂陷作用,该阶段属伸展裂陷发展的鼎盛时期,半地堑/地堑规模大,断陷深且沉降沉积速度快,主要沉积充填了大套中深湖相或河湖相沉积(东海为浅海或海陆过渡相沉积)。该时期属中国海域沉积盆地最主要的伸展张裂期,亦为构造增热事件的高峰期,是中国海域沉积盆地主要烃源岩形成发育期。按裂陷强弱程度也可分为两区:强烈裂陷区主要在渤海海域、南海北部湾盆地、珠江口盆地珠一拗陷和珠三拗陷、东海盆地浙东拗陷等,均形成了一系列规模较大的断陷;而弱裂陷区在东海盆地台西拗陷、珠江口盆地中央隆起带、南海北部大陆边缘莺歌海盆地、琼东南盆地等,仅形成一些中小型断陷群^[4]。

1.1.3 渐新世晚期萎缩裂陷幕

始新世末期-渐新世中晚期,区域性再次抬升并遭受剥蚀,进入伸展张裂/裂陷第三幕即晚期萎缩阶段的裂陷幕,在南海北部发生了珠江运动第二幕,东海发生玉泉运动^[17](在台湾称浦里运动),渤海则发生华北运动I幕。该阶段构造伸展张裂作用明显弱于第二幕,且部分断陷已开始向拗陷过渡转化,具有显著的断拗性质^[18],故亦可称为断拗转换过渡阶段。沉积充填物主要为河流相或河湖沼泽相及滨海平原沼泽相或浅海相沉积。按裂陷程度也分为两区:强烈裂陷区包括渤海渤中拗陷、南海北部边缘莺歌海盆地、琼东南盆地及珠江口盆地珠二拗陷,在渤中拗陷为中深湖相沉积,在莺歌海盆地、琼东南盆地及珠二拗陷为海陆过渡相沉积;其他地区裂陷作用相对较弱^[4]。

1.2 晚期裂后拗陷幕式热沉降作用

热沉降期主要发生在中新世早中期,由于破裂不整合产生的时间不同,中国近海沉积盆地不同区域裂后热沉降拗陷阶段亦早亦晚,但主要产生在渐新世之后,此间中国海域盆地及其邻区断裂活动弱,盆地整体沉降,且沉降幅度小,地层厚度薄,但莺歌海盆地比较特殊,其在该期沉积了巨厚的新近纪地层^[18-19],主要是受到红河断裂带走滑伸展活动影响

之结果。裂后热沉降阶段可分为两幕:

第一幕为晚渐新世-中中新世,是中国近海盆地重要的热沉降拗陷时期,此间海底扩张,洋壳增生,沉降沉积中心向洋迁移,伴有主要地质事件有:菲律宾海洋壳继续增生,东海盆地整体拗陷^[5]。南海因印度板块向北东俯冲而左行拉开,并发生海底扩张及洋壳增生,在南海西北部莺歌海盆地、西沙海槽和南海北部大陆架南缘形成了高热带^[20],且在南海北部大陆边缘形成了台西南盆地南部、珠江口盆地南部及琼东南盆地南部等深水区的的大型拗陷。

第二幕为中中新世末期-晚中新世,该阶段是中国海域及其邻区地质构造运动再次活跃的构造增热事件时期。伴有的主要地质事件有:菲律宾海板块洋壳向东海俯冲速度加快,琉球海沟、琉球岛弧逐渐形成,在晚中新世产生弧后伸展张裂,形成弧后裂谷的冲绳海槽^[21]。莺歌海盆地所处的红河断裂在晚中新世末期(约 5 Ma)则由早期左行走滑转为右行走滑伸展^[22],并产生走滑挤压,形成规模巨大的中央泥底辟隆起背斜构造带^[19]。在珠江口盆地形成一系列北西西走向的背斜或背斜带;晚中新世末,在台湾岛产生海岸山脉运动,逐渐形成背斜构造带;东海盆地普遍抬升,西湖凹陷东部形成巨大的挤压背斜构造带^[23];渤海盆地东部郯庐大断裂活动加剧,左行挤压形成一系列新断裂、花状背斜和披覆背斜。同时,晚中新世构造运动也波及到南黄海盆地,形成区域不整合。

1.3 新构造运动

晚中新世以来或上新世-第四纪时期的地质构造运动,一般称新构造运动^[3,19,24-25],在中国近海沉积盆地表现较强烈,各盆地甚至同一盆地的不同部分活动强度、活动方式不同。伴有的主要构造运动事件有:渤海海域除辽东湾拗陷西部凹陷及辽西低凸起以外,其他区域新构造运动表现为大规模的断裂活动^[24],渤中凹陷及其邻区数万平方千米的范围快速沉降,造成欠补偿沉积,导致大面积浅湖相沉积发育,构成了区域性的盖层。在北黄海盆地、南黄海盆地和北部湾盆地也发生个别断层正反转或形成逆断层^[26]。东海海域发生大规模构造反转,如在西湖凹陷形成中央反转断裂背斜带^[23]。南海北部东段珠江口盆地北西向断层成群成带发育。莺歌海盆地中央拗陷发生快速沉降沉积,形成规模巨大的中央泥底辟背斜构造带,而泥底辟高温超压热流体强烈上侵或刺穿上覆地层薄弱带,亦可通过断裂及裂隙直达海底,在海底形成大量麻坑及气烟囱^[19]。琼东

南盆地中央拗陷主要表现为大规模快速沉降沉积,但断裂活动弱,且缺少巨厚泥源岩物质,故未见泥底辟活动或甚少。台西盆地受台湾岛向西挤压影响反转强烈,地层发生强烈褶皱和推掩,形成台湾褶皱带,即称台湾运动^[27]。需强调指出的是,新构造活动对中国近海沉积盆地晚期油气成藏具有重要的控制和影响作用。

综上所述,中国近海沉积盆地区域构造特征及其演化过程,主要是受印度-澳大利亚板块、太平洋-菲律宾海板块和欧亚大陆板块相互运动制约及新生代相互作用和相互影响的结果。而中国近海盆地新生代区域构造演化特征及其特定的地球动力学背景,则决定了新生代沉积盆地的基本石油地质条件,亦是油气生成和富集成藏的地质基础。因此,对中国近海盆地构造演化特征的深入分析,有助于深刻认识和把握盆地油气分布富集规律及其重要特点。

2 盆地类型及成盆特点

(1)根据中国近海沉积盆地区域地质背景与构造演化特征,对中国近海沉积盆地类型及其成盆特点可以总结为两点:

①中国近海新生代沉积盆地一般均经历了两个发展演化阶段^[4,16]:其一是早期伸展裂陷阶段,形成古近系半地堑陆相断陷/洼陷;其二为晚期热沉降拗陷阶段形成了新近系海相拗陷,其间经历了明显的破裂不整合(图 2)。

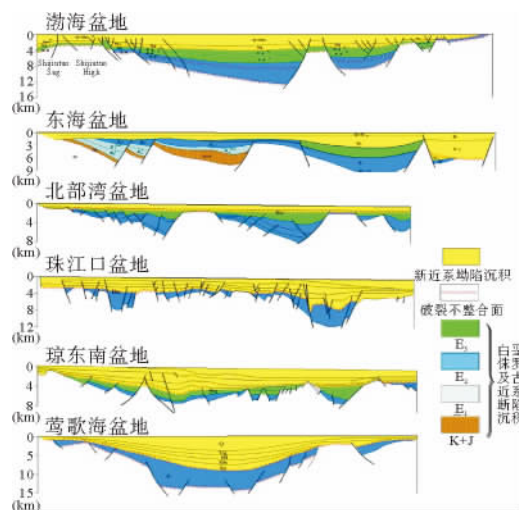


图 2 中国边缘海盆地断陷-拗陷双层结构基本特征
(据朱伟林,2009,修改)

Fig. 2 Basic characteristics of the rift-depression double-layer structure of Chinese marginal basin
(modified after Zhu Weilin,2009)

②伸展裂陷阶段是中国近海沉积盆地油气形成的基础。尽管中国近海沉积盆地存在多种类型,但古近纪均主要受伸展构造体系影响。在近海沉积盆地中由于裂陷作用,形成了规模不同数量众多的基底张性断裂,且伴生了一系列半地堑/地堑洼陷^[12],而每一半地堑洼陷就是一个独立的沉积及油气运聚系统和单元,各半地堑之间为一个相对隆起区,即为半地堑洼陷沉积的近物源区,进而构成了盆地古近纪多凸多凹、凸凹相间的基本格局^[3],亦控制和决定了生烃凹陷展布及其特定的含油气系统特点。

(2)中国近海沉积盆地经历上述两大演化阶段之后,最终形成一系列具有断陷-拗陷双层结构不同类型的沉积盆地,这些盆地均属伸展型或走滑伸展/挤压复合型盆地。

①陆内裂谷盆地:包括渤海盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、北部湾盆地^[12,26]。这类盆地是由于地幔上涌导致大陆岩石圈变薄、张裂、伸展而产生的裂谷盆地,它们发育在不同期的克拉通块体边缘。

②陆缘海离散型盆地:包括珠江口盆地、琼东南盆地、台西南盆地。这种类型盆地受伸展作用影响而原始裂开在大陆边缘,主裂陷期为大套陆相沉积,后因热沉降发生海侵,上覆海相沉积层序^[2,6]。

③弧后陆缘裂陷盆地:包括东海陆架盆地、台西盆地。这类盆地是由于板块碰撞,弧后边缘俯冲裂陷成盆^[5,28]。

④走滑伸展盆地:莺歌海盆地,既有地幔隆起引起的伸展作用,又受红河断裂巨大走滑影响以及南海扩张作用制约,多种地质因素导致其最终形成走滑伸展型盆地。

(3)中国近海沉积盆地形成演化普遍经历了早期伸展裂陷和晚期热沉降拗陷过程,其重要的油气地质意义具体表现在:

①早期断陷阶段形成了众多湖相富生烃半地堑洼陷:中国近海盆地早期古近纪伸展断陷阶段,盆地均被许多半地堑断陷/洼陷所分割,由于受区域应力场控制,半地堑断陷/洼陷主要沿呈迭瓦状排列的北东-北北东方向正断裂分布,因而断陷/洼陷亦呈北东-北北东方向展布^[13-16]。断陷/洼陷规模随相关主断裂变化,因而断陷/洼陷规模大小不一,从几十到上万平方千米均有。这些半地堑断陷/洼陷是油气形成最基本的地质单元,亦是油气运聚成藏的基础和重要地质条件。同时由于中国近海盆地中富烃凹陷发育于始新世及渐新世早期主裂谷断陷期,属欠补偿快速沉降沉积期,故形成了有利于浮游、底栖生物和藻类生长的古地理环境,沉积充填了规模巨大

富含有机质的中深湖相泥页岩烃源岩^[4,16]。这些富烃凹陷,新生界沉积厚度一般达8~12 km,主裂陷期沉积速率至少为300 m/Ma以上,极有利于生物有机质的保存。总之,古近纪半地堑是中国近海盆地中的富生烃凹陷,是油气勘探的地质基础,大量勘探实践表明,生烃半地堑及其临近富生烃半地堑周围的不同类型的大中型圈闭及复式圈闭群带是大中型油气藏(田)的富集场所。

②晚期热沉降海相拗陷阶段形成了有利含油气储盖组合。渐新世末到中中新世,中国近海海底扩张,洋壳增生,沉降中心随之由大陆边缘向海域及大洋一侧迁移,沉积厚度亦向海一侧变厚。此时除克拉通内裂谷盆地,如渤海盆地、南黄海盆地新近纪仍然保持着浅湖、沼泽及河流相等陆相沉积体系外,陆缘断陷盆地,如珠江口盆地、珠东南盆地、莺歌海盆地等新近纪均接受了大规模海侵,由古近纪陆相过渡到新近纪滨浅海相沉积,形成了有利油气运聚成藏的不同类型的储盖组合。例如渤海盆地绥中36-1大油田中,上渐新统东营组下段区域性泥岩盖层与东营组下段厚度逾百米三角洲砂岩储层构成了优良的储盖组合;琼东南盆地崖城13-1气田中,中中新统梅山组海相超压钙质泥岩盖层与下伏渐新统陵水组三段受潮汐影响的扇三角洲中粗砂岩储层构成了极佳的“黄金”储盖组合类型^[12,29]。

3 油气富集规律及特点

3.1 沉降沉积中心由陆向海转移导致烃源岩及油气具分带性

3.1.1 沉降沉积中心由陆向海转移特征

中国近海盆地处于大陆边缘陆壳向海域洋壳逐渐减薄的过渡带上,往往具有从大陆边缘向海域及深水洋盆方向,随其莫霍面埋深变浅、地壳越来越薄和地壳性质由陆壳逐渐向洋壳转变,导致其热流场及大地热流递增。在伸展拉张沉降过程中,盆地存在明显差异沉降和热传导,故制约和影响了沉降沉积中心发生转移,导致其沉降沉积中心普遍具有由陆向海迁移的特点^[2,30],进而控制和制约了油气生成及运聚成藏与分布富集规律。如渤海盆地渤中拗陷(图3A),其第三系沉降沉积中心明显存在由太行山、燕山褶皱带和鲁西、辽东隆起向渤中拗陷转移的特点,故油气生成及含油气层位和油气藏分布等,均具有由西向东、由陆地向海域的渤中拗陷逐渐变新、油气主要富集于年轻的生烃凹陷中心或围绕其分布^[12]。

东海盆地由陆向海地壳减薄、沉降沉积中心由西而东、由陆向海转移亦非常明显。东海地壳厚度由西部大陆架往东到冲绳海槽,地壳厚度明显减薄。盆地裂陷和沉降沉积中心从晚白垩纪开始,亦表现出明显的“向洋迁移”特点(图 3B)。东海盆地西部的丽水-椒江凹陷,白垩纪末至古新世已开始断陷,到瓯江运动以后转入裂后拗陷。而盆地东部的西湖凹陷,则存在明显滞后现象,在始新世方进入断陷阶段,始新世末整个盆地的断陷阶段结束,盆地东部方

转入裂后热沉降拗陷。盆地西部始新世末以来长期处于区域性抬升,普遍缺失渐新世至中新世下部地层,沉积中心则明显向东转移。

南海北部边缘盆地第三系裂陷阶段和沉降沉积中心,其由陆向海转移的特征更为明显和突出。陆上茂名、三水盆地均为古新世断陷,向南到了海上的珠江口盆地和琼东南盆地的断陷及沉降沉积中心,即自华南陆缘区岸边逐渐向海域陆架、陆坡转移(图 3C、D)。如珠一坳陷的主裂陷期在古近纪,而珠二

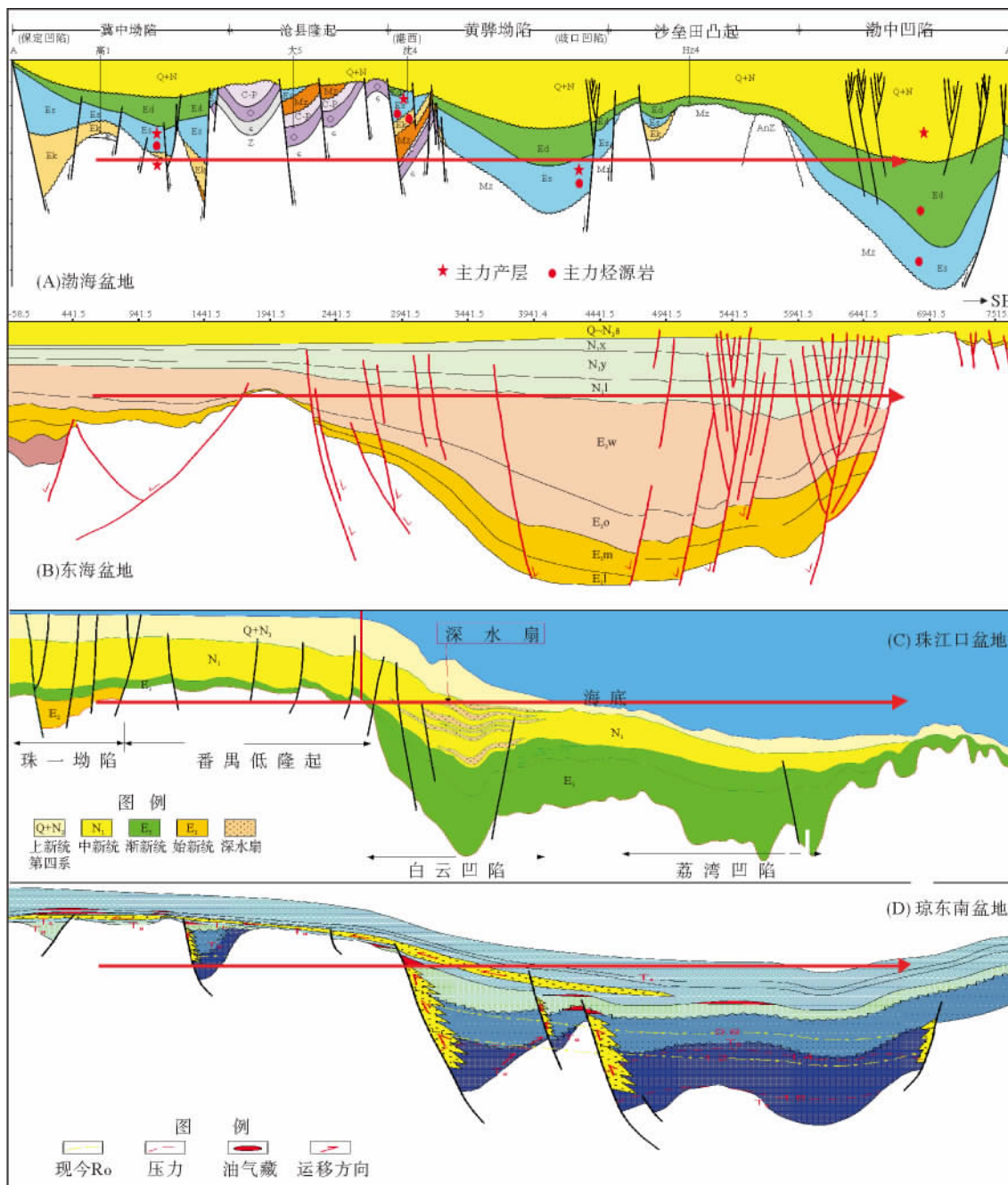


图 3 中国近海主要盆地沉降沉积中心由陆向海迁移特征

Fig. 3 The subsidence-depositionae center shifting from southwest to northeast of China offshore basins

拗陷主裂陷期则有所推迟;琼东南盆地北部拗陷带主裂陷期和沉降沉积中心亦为古近纪,而向南东的中央拗陷则为新近纪早期,且充填有巨厚沉积。莺歌海盆地第三系沉降沉积中心自北西向南东迁移特征更加明显,自古近系到新近系及第四系,层层向东南方向转移,且沉降沉积中心轴线具有沿北西-东南向雁行式排列与逐层复合叠置的特点。

3.1.2 烃源岩及油气分带性

大陆边缘各类沉积盆地沉降沉积中心由陆向海逐渐转移的结果,形成了近陆缘内带和远离陆缘的外带。近陆缘内带,以陆相断陷沉积充填为主,海相拗陷沉积较薄,总体沉积规模小;远陆缘外带,断陷/拗陷沉积均厚,总体沉积充填规模大,因而在中国近海形成了2个区域规模颇大的拗陷带^[4,16],即在近海大陆边缘形成了内带(第一凹陷带)和远离大陆边缘的外带(第二凹陷带)两个盆地带(图1),最终导致油气生成、运聚成藏及其分布特征亦具有由陆向海变新,且出现内油外气的分带分布规律。

邻近大陆边缘的内带盆地,地壳厚度为24~40 km,地温梯度为2.8~3.5 °C/hm^[31]。从北到南包括渤海湾盆地(海域部分)、南黄海盆地、珠江口盆地珠一与珠三拗陷、北部湾盆地,它们均属华北或华南大陆板块陆内裂谷盆地,箕状半地堑的湖相沉积为其基本沉积单元,且其中深湖相展布规模较大,主力烃源岩是中深湖相暗色泥岩,如渤海盆地的渐新统东营组下部、始新统-下渐新统沙河街组、南黄海盆地的白垩系泰州组和古新统阜宁组、台北拗陷与台西盆地的月桂峰组、珠一拗陷和珠三拗陷文昌组、北部湾盆地流沙港组等均是晚古新世—始新世的湖相沉积,其是这些盆地的主力烃源岩^[32-33]。

远离大陆边缘的外带盆地处在陆-洋过渡壳上,地壳厚度为18~28 km,地温梯度为3.5~5.5 °C/hm^[31],从北到南包括东海盆地东部、珠江口盆地珠二拗陷、琼东南盆地和莺歌海盆地,这些盆地主要为以拗陷型结构为主的叠合断陷盆地,古近系属陆相、海陆过渡相和海相沉积,主要地层为非陆相或海陆交互相,其中东海盆地和台西盆地古新统以及南海北部大陆边缘的珠二拗陷和琼东南盆地始新统尚存在裂陷作用,形成一系列湖泊群^[32-33],但湖相沉积规模明显比近海大陆边缘内带规模减小,其主要沉积单元则是断拗期规模巨大的海陆过渡相与海相沉积。东海盆地西湖凹陷始新统平湖组、珠二拗陷渐新统恩平组和琼东南盆地渐新统崖城组均发育海陆过渡相煤系沉积,莺歌海盆地和琼东南盆地还发育有巨厚的中新统海相沉积。这些海陆过渡相及海

相沉积体系展布规模大,沉积厚,埋藏较深,它们是中国近海大陆边缘外带盆地中的主要烃源岩。其中,尤以海陆过渡相煤系烃源岩生烃潜力最大。

前已述及,中国近海盆地结构存在明显的差异性,这种差异性决定了中国近海盆地烃源岩的差异性和分带性。由于上述烃源岩形成时沉积环境的差异,因而导致两个盆地的烃源岩类型明显不同^[16,32-33],大陆边缘内带烃源岩多为中深湖相泥岩,生烃母质为低等水生生物,生油潜力大,可为油藏形成提供充足的油源;而大陆边缘外带烃源岩多为海-陆过渡相的煤、碳质泥岩与浅海泥岩,生烃母质主要为陆源高等植物^[32-34]。这就决定了两个盆地带烃源岩有机质类型的差异。大陆边缘内带烃源岩多为腐泥型、腐殖-腐泥型有机质;而大陆边缘外带烃源岩为腐殖型、腐泥-腐殖型有机质,故导致其生烃产物及生烃潜力截然不同,内带以生油为主,伴生大量天然气;外带以产气为主,伴生少量凝析油等。很显然,大陆边缘内外带这种不同母质类型烃源岩的展布特点,最终决定了其内带以找油为主,而外带则以找气为主。迄今为止中国近海找到的大量油田基本上均位于内带及邻近的隆起上,且内带的少数几个气田的天然气成因类型亦为油型气或油田伴生气;而在大陆边缘外带范围油气勘探所发现的均是气田,其天然气成因类型均属煤型气。

3.2 地温场与油气生成富集

地温是决定有机质热演化程度及烃类产物类型的最主要的热动力学因素。盆地沉积充填的烃源岩在埋藏热演化过程中,其有机质在不同热演化阶段均可形成不同类型、不同性质的烃类产物,而这些不同性质、不同相态的烃类产物均主要受控于有机质热演化程度及生源母质类型的差异。中国近海沉积盆地处于不同板块背景的大地构造位置,不同地区其盆地深部结构及基底地壳类型与上覆沉积充填的地层厚度等均存在明显差异。正是由于地层沉积充填厚度及岩性特征的差异,导致了不同类型盆地形成演化过程中的热传导、热对流方式差异较大,故造成不同类型盆地及凹陷的热流场和地温梯度变化大,最终导致不同类型盆地热演化史、沉降及沉积充填史等差异明显,最后必然会综合影响到烃源岩中有机质热演化程度及烃类产物类型。因此,中国近海第三系盆地中大量油气田及天然气气田形成及分布,除受烃源岩有机质丰度及母质类型等自身因素的控制和影响外,更主要且非常重要的控制因素乃是热力作用对有机质热演化生烃的影响和制约,即

主要受盆地热演化史及其所形成的热流场及地温梯度高低的控制。如渤海盆地大部分地区、南海琼东南盆地北部及珠江口盆地北部浅水区和北部湾盆地,这些地区大地热流场及地温梯度相对较低,地温梯度一般为 $3.3 \sim 3.6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hm}$,故烃源岩主要以生成大量石油为主伴生少量油型气^[4,35],但其中的辽中凹陷北部、渤中凹陷和珠三拗陷的文昌 A 凹陷以及珠江口盆地南部深水区,由于裂陷期持续发育,渐新世断陷幅度大,裂后期沉降幅度也很大,故这些地区的热流场及地温梯度明显偏高($3.6 \sim 4.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hm}$),古近系烃源岩埋藏深,有机质热演化达到了高熟—过成熟阶段,进入了高过熟油气门槛及早期气窗范围,因而这些地区不仅有高熟石油产出,且主要以大量天然气及凝析油为主^[4]。再如南海西北部莺—琼盆地和珠江口盆地南部深水区及东海盆地的西湖凹陷,由于第三纪及第四纪均接受了巨厚沉积,且盆地深部地壳薄、热流场及地温梯度较高($3.8 \sim 4.7 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hm}$ 以上),故导致裂陷期烃源岩甚至拗陷期海相烃源岩成熟度较高,均达到高成熟生气阶段,因此主要以大量生气为主,为近海沉积盆地大中型气田形成提供了充足的气源供给,这些地区目前均为海域重要的富气盆地。总之,中国近海盆地内带邻近大陆边缘,属大陆型地壳,相对较厚,地热流场及地温梯度较低,第三系烃源岩多处在油窗范围,故以生油为主;而近海盆地外带远离大陆边缘,属海陆过渡相地壳或靠近洋壳的位置,地壳薄,盆地地热流场及地温梯度较高,第三系烃源岩处于气窗之内,故以大量成气为主伴有少量凝析油及轻质油。

3.3 富烃凹陷/洼陷控制油气富集

大量勘探实践表明,富烃凹陷的存在决定了油气富集程度。中国近海沉积盆地中,其 10 个富烃凹陷发现的石油储量约占海域总石油储量的 90% 以上;而 4 个富气凹陷其烃类气储量亦占海域烃类气储量的 75% 左右^[36]。前已述及,始新世及渐新世主裂谷断陷期形成的凹陷,多处在欠补偿快速沉降期,具有有利于浮游及底栖生物和藻类生长的古环境,沉积了规模巨大富有机质的中深湖相烃源岩,形成了资源潜力巨大的富烃凹陷^[37]。这些富烃凹陷的存在控制了大油气田或油气田群分布,如渤海盆地的渤中凹陷、辽中凹陷,东海盆地西湖凹陷,珠江口盆地惠州凹陷、西江凹陷、文昌凹陷、白云凹陷,北部湾盆地涠西南凹陷,莺歌海盆地莺中凹陷等。

中国近海盆地普遍存在断陷期形成的规模不同的凹陷/半地堑洼陷,其与上覆裂后期形成的范围较

大拗陷相互叠置,往往形成了上面“大盆”下面“小洼”的双层盆地结构特征。由于主要烃源岩一般均沉积充填在凹陷/半地堑洼陷内,其与呈间互层分布的砂岩储集层能够构成自生自储的半地堑式自源型油气运聚成藏体系。然而,对于中国近海沉积盆地而言其烃源供给均来自古近系凹陷/半地堑生烃洼陷及其湖相烃源岩,仅个别盆地某些新近系沉积巨厚的局部地区的烃源供给可来自新近系拗陷沉积的中新统海相烃源岩(如莺歌海盆地)。因此,古近系凹陷/半地堑洼陷及其生烃中心,始终是中国近海沉积盆地油气勘探中评价和圈定寻找油气富集区的关键。中国东部新生界陆相断陷盆地油气勘探程度较高的探区和中国近海盆地油气勘探实践结果均表明,评价预测一个具有双层叠置结构断陷盆地的油气勘探前景,其非常重要的油气地质条件及特点是,其油气运聚富集与分布并不是受上覆裂后拗陷形成的“大盆”所控制和制约,而是受控于断陷裂谷时期形成的陆相凹陷/半地堑富生烃洼陷的沉积充填规模及其展布特点。这种具有断拗双层叠置结构的盆地,其深部每一个沉积充填了巨厚湖相烃源岩的凹陷/半地堑洼陷就是一个生烃中心,当其与周围及上覆储集层和构造-岩性圈闭带配置良好时,则可组成一个油气生成、运移、聚集的动平衡成藏的基本油气聚集单元和含油气系统,而大多数油气田则多围绕凹陷/半地堑洼陷生烃中心分布^[12],且大部分油气田及油气分布多具有“向心式”的运聚富集规律,如渤海盆地渤中富生烃凹陷/洼陷中心与周缘围绕其展布的大中型油气田即为其典型实例。因此,在断陷盆地中确定凹陷/半地堑洼陷生烃中心,进而综合分析评价其周围具有优势运聚条件的有利油气富集区带及目标,即可发现油气田及油气富集区。

3.4 新构造运动控制油气晚期成藏

中新世晚期至第四纪是中国近海第三纪盆地裂后热沉降最活跃的时期,并伴随着裂后构造再活动。渤海湾、东海、莺歌海、珠江口等盆地,中中新世晚期至第四纪,是裂后热沉降最活跃时期,各盆地普遍发生了新构造运动^[19,24-26],如中新统末、上新统与第四系之间及层系内部的不整合,中新世及第四纪沉降中心的迁移,尤其是中新世晚期及第四纪强烈的断裂活动及活跃的天然地震等。这些新构造运动均控制和影响了盆地构造格局改变及其油气运聚成藏特点,而盆地最晚期的构造断裂活动,则最终控制和影响了盆地中油气运聚与动平衡成藏^[3],亦调整和控制了各盆地最终油气藏分布格局和油气田定

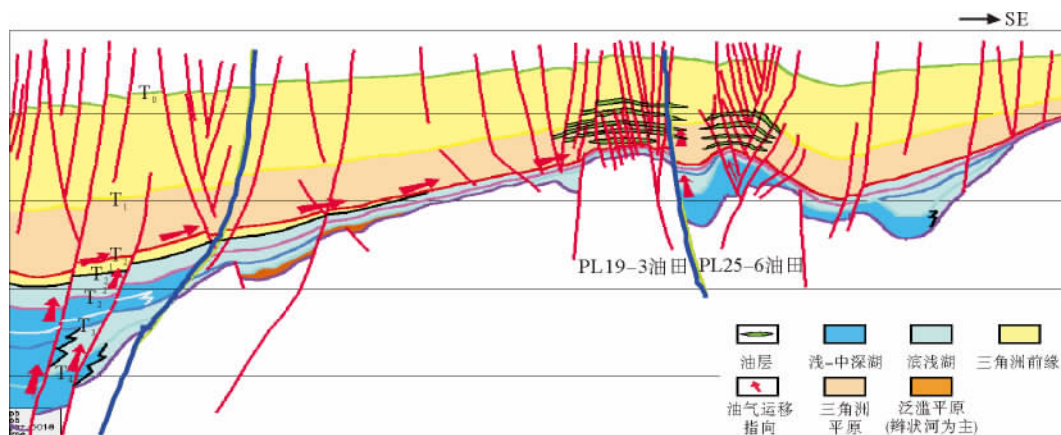


图4 渤海盆地 PL 地区新构造运动导致油气运聚动平衡成藏的典型地质解释剖面

Fig. 4 The typical geological section showing dynamic balance accumulations resulted from oil-gas migration and accumulation by neotectonic movement in PL region of Bohai Basin

型。以下以几个典型盆地新构造运动控制油气晚期成藏的实例说明之。

渤海湾盆地在中新世末以来,新构造运动不仅形成和改造了一批晚期圈闭,而且优化了渤中巨型含油气系统的输导体系,加之渐新统东二段、中新统馆陶组砂岩体和新构造运动形成的断裂系统的有效配置,构成了有利的油气优势运移通道。如 PL19-3 油田在中新世晚期,由于新构造运动形成的纵向断裂系统导致深部油气向浅层运聚,其油气主要是通过新构造运动产生的郯庐浅层断裂网、中新统馆陶组大砂岩体,沿渤南隆起北倾鼻状构造脊向上较长距离侧向运聚,在浅层构造圈闭中聚集成藏(图4)。该浅层构造圈闭断裂较发育,且存在微渗漏现象,但由于该区油气源供聚大于散失,最终形成了具有运聚动平衡成藏特点的大油气田^[3]。

莺歌海盆地新近纪以来强烈沉降,接受了 10 000 m 以上的新近系沉积,第四纪沉积速率高达 1 000 m/Ma,是一个受新构造运动控制成盆的非常年轻的盆地。天然气运聚成藏主要受中新世晚期及上新世新构造运动伴生的强烈泥底辟热流体活动所控制^[7,11,30],盆地具有以新近系巨厚海相坳陷沉积为主的断拗双层结构,由于中新世晚期以来快速沉降沉积,导致地层系统具欠压实和高温超压特点,进而促进了泥底辟形成及热流体上侵活动。泥底辟及热流体活动的最终结果,往往导致在不同深度形成了底辟伴生背斜圈闭,同时亦产生了高角度断裂和垂向裂隙系统,构成了高温超压流体及天然气的纵向快速运聚通道,促使天然气以幕式快速充注、多期运聚的形式,在浅层不同类型的圈闭中富集成藏。须强调指出,由于泥底辟热流体活动在不同构造及

区块的差异性以及圈闭受底辟活动影响多存在一些微渗漏,故导致了天然气运聚成藏均具有明显分块、分区、分层的富集特征和气源供给大于散失的动平衡运聚成藏的特点。

东海盆地西湖凹陷上新世—更新世发生的新构造运动,产生了一批横切中央背斜构造带的近 EW 向晚期断裂,虽然这些断裂规模不大,断距很小,但对早期形成的油气藏产生了破坏作用^[3],导致油气部分逸散,大大降低了油气田的充满度。由于晚期断裂分割控制油气藏的油气水系统,造成不同断块含油气幅度均差别很大,致使某些断块油气散失严重,剩余油气藏储量规模明显减小,很显然,这主要是由于晚期断裂破坏活动,最终导致油气大量散失而影响了油气田的储量规模及富集程度。

3.5 非常规天然气(水合物)分布富集特点

我国科研工作者 20 世纪 90 年代以来在中国海域开展了大量的天然气水合物勘查研究工作,分别在地震资料处理与分析技术、BSR 识别技术、岩石物理、含水合物沉积层物性参数研究及水合物和游离气饱和度估算等研究方面取得了许多成果和认识^[38-40],且已经圈定了多处水合物可能赋存地区,主要包括东海冲绳海槽、台西南盆地、珠江口盆地东沙海域、神狐海域、琼东南盆地西沙海槽等深水区。以下主要对东海深水区冲绳海槽与南海北部深水区天然气水合物资源分布特点进行阐述与分析。

3.5.1 东海冲绳海槽

东海地区天然气水合物资源主要分布于冲绳海槽深水区,冲绳海槽是晚喜马拉雅期菲律宾板块俯冲导致火山弧后扩张形成的半深海弧后盆地,海槽

内主要沉积充填了巨厚新近纪及第四纪地层。通过区域构造地质背景、构造演化及沉积充填特征和温压条件等综合分析,发现冲绳海槽及其两侧斜坡均具备天然气水合物成矿的有利地质条件,具有良好的天然气水合物资源前景。迄今为止,在东海冲绳海槽及其邻近海域所进行的海洋地质调查,均已陆续发现了天然气水合物存在的地质地球物理及地球化学异常标志和其他各种异常标志及证据。方银霞等^[41]、孟宪伟等^[42]、栾锡武等^[43]在冲绳海槽的部分地震剖面上,均发现了BSR似海底反射层。根据冲绳海槽深水区的温压地质条件,方银霞等、栾锡武等亦深入分析了天然气水合物存在的温压、热流条件及可能的分布区域,以及天然气水合物稳定带厚度及展布规模。卢振权等^[44]在冲绳海槽发现了海底浅表层沉积物存在烃类异常;Yin等^[45]研究了海槽西坡顶部发育的与水合物聚集有关的海底泥火山,认为天然气水合物气体来自深部的热液系统散发的甲烷、二氧化碳和氢气;俄罗斯Obzhirov博士亦曾对东海冲绳海槽地区底水进行过系统的气体地球化学调查,在冲绳海槽JADE区的西部陆坡和钓鱼岛附近海域亦发现了多处底水中存在甲烷含量异常。

通过天然气水合物稳定带形成条件的综合地质分析评价,目前已初步圈定出东海海域天然气水合物分布富集区,该富集区主要展布于东海陆坡区即冲绳海槽盆地北部和南部。该区平面上天然气水合物稳定带展布规模及范围,为从水深500 m的陆坡下缘到冲绳海槽的中轴部分,总面积约70 000 km²。该区天然气水合物稳定带厚度变化较大,从冲绳海槽中部地区400 m至北部和南部地区达1 100 m。剖面上该区天然气水合物稳定带主要赋存于上新统及第四系浅层沉积地层中,这与南海北部边缘盆地深水区天然气水合物分布特征基本一致。冲绳海槽中部由于高热流的影响,天然气水合物成矿条件相对较差,天然气水合物稳定带分布厚度较薄;而北部和南部,由于温压等地质条件较合适,有利于天然气水合物形成,天然气水合物稳定带厚度及展布规模较大^[46]。因此,冲绳海槽北部和南部深水区应是该区天然气水合物的主要分布富集区,亦是未来东海盆地天然气水合物资源勘探突破的重点区域。

3.5.2 南海

南海北部大陆斜坡极为广阔,存在汇聚型、离散型等不同类型板块边缘的大陆坡,受构造运动及水流作用等影响,陆坡地形复杂多变,整体呈阶梯状下降,发育陡坡、海台、海脊、海槽、海谷、深水阶地、海底滑塌及海底扇等各种构造地貌,存在有利于水合

物形成的地质构造环境及构造部位^[47-48]。根据天然气水合物形成的温压地质条件,可确定南海北部陆坡区在大于500 m水深的条件下,基本可以满足天然气水合物形成所需高压地温场条件。须强调指出的是,南海北部深水区及中央洋盆和某些局部地区热流值总体上较高(对水合物形成存在一定负面影响),但不同海域存在较大差别,如中央海盆、西南海盆、西部陆架、琼东南盆地南部、珠江口盆地南部、南部陆架区等热流值比较高,可达75~120 mW/m²;而西沙海槽(<70 mW/m²)和笔架南盆地北部、台西南盆地、南沙海槽盆地等,热流值相对较低,一般小于70 mW/m²^[4,35]。根据南海边缘海盆地区域地温场的热流变化规律,该区往往多具有中央洋盆区及陆坡深水区及部分陆架浅水区热流值高、大部分陆架浅水区热流值较低的变化特点及趋势。很显然,这种地温场热流值的变化对不同地区油气成因类型的形成及分布富集规律均有重大影响。总之,南海陆坡深水区广阔,沉积物厚度大,有机质较丰富,有机质生烃及气源供给充分,这些区域不仅深部油气藏及浅层生物气和浅层热解气分布广泛,且深水海底及浅层尚具有适宜天然气水合物形成的构造地貌及特定温压环境,具备了形成天然气水合物的成矿条件和天然气水合物资源的勘探前景。

根据南海天然气水合物成矿成藏条件的初步评价预测结果^[49],南海北部和南部深水区发育有多个天然气水合物有利成矿成藏异常区,通过高分辨率多道地震、海底热流、地形地貌、沉积物及生物标志物、烃类地球化学异常标志等的系统探测与综合分析研究,中国地质调查局目前已在南海北部深水区圈定了4个有利天然气水合物成矿成藏分布区,即西沙海槽区(长昌凹陷)、东沙隆起南部及台西南南部海域、珠二坳陷南部神狐(白云)海域和琼东南南部等深水海域;在南海西南部及南部深水海域则圈定了中建南南部和文莱-沙巴西南部两个有利天然气水合物成矿成藏分布区。其中,西沙海槽深水区天然气水合物主要分布在西沙海槽北部斜坡和中部一带,最有利分布区为海槽北坡和槽底平原区,其次为海槽南坡及海槽南坡的海底平原区;东沙隆起深水区有利天然气水合物分布区主要分布于东沙群岛东南部深水海域;神狐(白云)深水区有利天然气水合物分布区,则位于南海北部陆坡中段的神狐暗沙东南海域附近,该区BSR反射层、甲烷异常指标、氯离子和硫酸根浓度、碳酸盐结壳等重要的地球物理及地球化学证据非常明显。2007年在该区即珠江口盆地珠二坳陷白云凹陷东南部实施了天然气水合

物钻探作业,在水深 1 230~1 245 m 的深水海底浅层未成岩地层 183~225 m 处,钻获了呈分散浸染状分布于灰色未成岩软泥中的天然气水合物实物样品^[50]。通过古生物及生物地层学分析确定其地层位属晚中新世/上新世—第四纪,表明天然气水合物主要赋存于时代新、埋藏浅的深水海底未成岩沉积物中,其气源供给通过地球化学分析证实,主要来自浅层原地形成的以生物气为主的混合气^[51]。总之,南海北部深水天然气水合物的钻探成功,标志着我国天然气水合物勘查及地质研究工作均取得了突破性进展。

3.6 深水油气与天然气水合物及浅层气叠置分布特点

南海北部深水(水深 > 500 m)广阔,约占南海北部海域面积 2/3 以上,区域地质上属于南海北部准被动大陆边缘盆地,位于减薄型洋陆过渡地壳区,其地温场较高,沉积充填厚。目前该区油气勘探及研究程度虽然尚低,但通过近年来对外合作与自营并主油气勘探方略的实施,已取得了重大进展和一些重要的钻探成果,先后在珠江口盆地南部深水白云凹陷钻探了 10 余个局部构造圈闭目标,并在白云凹陷东南部的 LW3-1 和 LH34-2 及 LH29-1 构造圈闭获得重大天然气发现^[52],在白云凹陷东北部 LH16-2 构造圈闭获得石油发现,同时,在邻近深水区的白云—番禺低隆起上先后钻探的多个构造圈闭亦获重要商业性天然气发现,获得探明和控制及预

测天然气地质储量超过千亿立方米。

在白云凹陷东南部及东北部深水 LW3-1、LH34-2 及 LH29-1 和 LH16-2 四个断块构造圈闭钻井气测录井过程中,自上而下由浅至深均见到强烈的天然气显示,地化分析表明这些天然气的气源构成及供给,不仅有深部输送上来的大量成熟—高熟热成因气,亦有浅层生成的生物气或两者的混合气。同时在该区(白云凹陷神狐调查区)深水海底地球物理调查及钻探亦获得富含天然气水合物的沉积物样品,地化分析表明天然气水合物气源亦主要属生物气成因类型,但也存在部分深部热成因气的混入和混合^[53]。这就充分表明南海北部珠江口盆地白云凹陷深水深部常规成熟—高熟油气与浅层天然气(深部运移上来的成熟热解气)和生物气及深水海底沉积物中的天然气水合物,在烃气源构成及烃源供给输送系统方面与空间分布上存在密切的成因联系,且具有一定的规律性和共生组合及耦合叠置复式聚集关系^[49-55]。因此,珠江口盆地白云凹陷深水深部成熟油气与浅层气(热解气及生物气)及深水海底天然气水合物的空间分布,在剖面上构成了一个由深水海底非常规资源(水合物)及浅层常规天然气(生物气及热解气)与深部常规资源(成熟—高熟油气)所组成的纵向共生叠置展布序列和多种油气资源复式聚集的空间格架(图 5)。即剖面上天然气水合物分布在陆坡深水海底以下 160~300 m 的晚中新世—上新世未成岩深灰色沉积物中,其形成的天然气水合物稳定带可作为下伏深部常规成

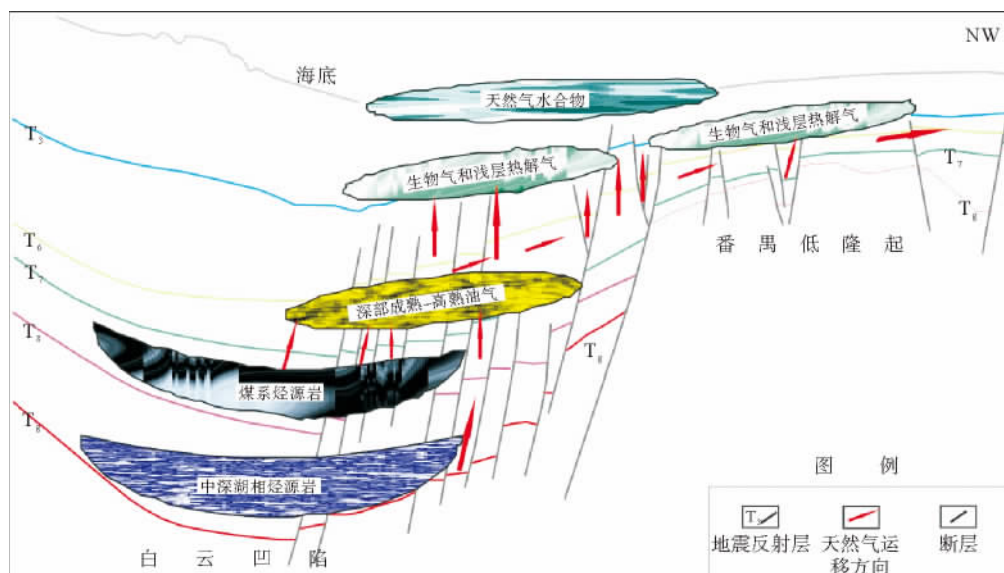


图 5 珠江口盆地白云凹陷深水油气与浅层气、生物气及天然气水合物叠置富集关系(据中海油资料,2007,修改)

Fig. 5 A superimposed model of deepwater gas-oil, shallow gas, biogenic gas and gas hydrate in Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin(modified after CNOOC,2007)

熟—高熟油气藏的区域封盖层,由于天然气水合物稳定带在地质条件下为固体冰状物,其渗透率为零,故能够有效阻止和遏止深部油气向浅层渗漏与扩散损耗;而天然气水合物稳定带以下,则分布有浅层游离天然气和气藏(主要为 300~2 300 m 生物气或深部运移上来的部分热成因天然气);在其更深部(3 000 m 以下)则存在常规成熟—高熟油气藏或天然气藏,即深部富集常规油气资源。因此,基于深水海区深部常规油气藏与生物气及浅层次油气藏和深水海底天然气水合物形成分布上成因联系和空间上的共生耦合关系,以及在空间展布上自下而上所构成的深部常规油气藏、浅层次生油气藏,超浅层及海底天然气水合物的共生组合及叠置分布特点,可以指示和追踪深部常规油气藏存在的可能性及其分布规律,亦可作为深部油气藏勘探的指向和重要示踪,进而指导深水油气勘探决策部署及勘探目标评价优选,同时,这种深部常规油气资源与浅层次生油气藏及海底天然气水合物非常规油气资源的空间共生组合及耦合叠置关系的存在,亦大大拓宽了不同类型多种油气资源的勘探领域,扩大了资源规模,极大地增强了总的资源潜力^[54]。

4 结论

(1)中国近海沉积盆地处在三大板块相互作用和影响的特殊位置,盆地性质及类型主要属伸展型、走滑伸展型及走滑伸展/挤压复合型。中国近海盆地与中国东部陆相断陷盆地一样,具有断拗双层结构,不同类型断拗结构特点及展布规模控制了油气分布及资源潜力。

(2)由于中国近海新生代盆地具有由陆架向深海洋盆地地壳性质及厚度逐渐递变减薄的特点,故存在明显差异热传导,导致其沉降沉积中心普遍具有由陆向海逐渐迁移的特点,进而控制和影响了油气生成与运聚富集规律。

(3)中国近海盆地油气分布规律与盆地断拗结构及沉积充填特点具有明显的分带性:近陆缘区盆地内带,地壳相对较厚属陆壳性质,地温场低,主要富集石油资源;远陆缘区盆地外带及其深水区,地壳较薄属洋陆过渡型或洋壳型,地温场高,主要富集天然气(烃类气/非烃气)、高熟深水油气和天然气水合物等。

(4)新构造运动决定了盆地及区带最终构造格局,亦控制和影响了油气运聚成藏及分布富集规律。油气源供给大于散失是中国近海盆地晚期油气运聚

动平衡成藏的重要特点。

(5)富生烃凹陷/洼陷是中国近海盆地油气形成的基本地质单元,当其与周围的储集层和构造-岩性圈闭带时空配置极佳时,即可构成油气生成、运移、聚集和运聚动平衡成藏的含油气系统,而富生烃凹陷/洼陷展布规模则控制和影响了大油气田或油气田群分布富集。

(6)天然气水合物主要分布在东海盆地冲绳海槽、南海北部陆坡区大于 500 m 水深的海域。深水海区深部常规油气藏与浅层生物气及浅层次生热解气和深水海底天然气水合物形成分布上,具有一定的成因联系和空间上的共生耦合关系,空间展布上自下而上构成了深部常规油气藏、浅层天然气藏(生物气及热解气)与超浅层及海底天然气水合物的共生组合及叠置分布的特点。

参考文献 (References)

- [1] 王洪才,李三忠,刘鑫,等.南海北部陆缘盆地群新生代构造过程与油气运聚规律[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(1):73-82. [WANG Hongcai, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Cenozoic geological processes and their bearing on hydrocarbon migration and accumulation in the continental marginal basin group of the northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(1): 73-82.]
- [2] 李三忠,索艳慧,刘鑫,等.南海的盆地群与盆地动力学[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(6):55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIUXin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.]
- [3] 龚再升.中国近海盆地晚期断裂活动和油气成藏[J].中国石油勘探,2004(2):12-20. [GONG Zaisheng. Late-stage fault activities and oil and gas reservoir formation of China's offshore basins[J]. China Petroleum Exploration, 2004(2): 12-20.]
- [4] 张功成,陈国俊,张厚和,等.“源热共控”中国近海盆地油气田“内油外气”有序分布[J].沉积学报,2012,30(1):1-19. [ZHANG Gongcheng, CHEN Guojun, ZHANG Houhe, et al. Regular distribution of inside-oil fields and outside-gas fields controlled by source rocks and heat in China offshore basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 1-19.]
- [5] 孙肇才.从东海石油地质重要进展看西太平洋大陆边缘新生代盆地的构造演化——一种海沟向洋后退的残余弧后盆地演化模式[J].海相油气地质,2004,9(1):1-17. [SUN Zhao cai. Progress of petroleum geology research for the East China Sea and on tectonic evolution of Cenozoic Basins in the continental margins along the West Pacific Ocean: An evolutionary model of oceanwards-receding residual rear-arc Basins [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2004, 9(1): 1-17.]
- [6] 何家雄,陈胜红,马文宏,等.南海东北部珠江口盆地成生演化与油气运聚成藏规律[J].中国地质,2012(1):106-118. [HE

- Jiaxiong, CHEN Shenhong, MA Wenhong, et al. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou Basin, Northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 2012(1): 106-118.]
- [7] 何家雄, 马文宏, 陈胜红, 等. 南海北部珠江口盆地浅水与深水油气运聚成藏机制及特点[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 39-49. [HE Jiaxiong, MA Wenhong, CHEN Shenhong, et al. The mechanism and characteristics of oil and gas migration and accumulation in shallow and deep water of Zhujiangkou Basin, Northeastern South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 39-49.]
- [8] 傅宁, 米立军, 张功成. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因[J]. *石油学报*, 2007, 28(3): 32-38. [FU Ning, MI Lijun, ZHANG Gongcheng. Source rocks and origin of oil and gas in the northern Baiyun Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 32-38.]
- [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. [ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.]
- [10] 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水油气成藏条件早期预测与评价[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(6): 780-789. [HE Jiaxiong, DENG Yunhua, MA Wenhong, et al. Early forecast and evaluation on petroleum accumulation conditions in deep basin in northern continental margin of the South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 780-789.]
- [11] 李运振, 邓运华, 徐强, 等. 板块运动对中国近海新生代盆地沉降及充填的控制作用[J]. *现代地质*, 2008, 24(4): 719-726. [LI Yunzhen, DEN Yunhua, XU Qiang, et al. Controls of plate motions on subsidence and filled characteristics of the Cenozoic in Chinese offshore basins[J]. *Geoscience*, 2008, 24(4): 719-726.]
- [12] 王善书. 我国近海半地堑的石油地质特点及石油勘探开发发展战略[J]. *中国海上油气*, 1997, 11(6): 389-397. [WANG Shanshu. Petroleum geological characteristics of half-grabens and oil Exploration and development strategy in offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 1997, 11(6): 389-397.]
- [13] 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J]. *石油学报*, 1998, 19(3): 6-10. [ZHU Weilin, JIANG Wenrong. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 6-10.]
- [14] 李春荣, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 195-203. [LI Chunrong, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 195-203.]
- [15] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 琼东南盆地深水构造格局和幕式演化过程[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(1): 151-162. [LEI Chao, REN Jianye, PEI Jianxiang, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 2011, 36(1): 151-162.]
- [16] 李友川, 邓运华, 张功成. 中国近海海域烃源岩和油气的分带性[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(1): 6-12. [LI Youchuan, DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng. Zoned distribution of source rocks and hydrocarbon, offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(1): 6-12.]
- [17] 张敏强, 钟志洪, 夏斌, 等. 东海西湖凹陷中南部晚中新世构造反转与油气运聚[J]. *中国海上油气*, 2005, 17(2): 73-79 [ZHANG Minqiang, ZHONG Zhihong, XIA Bin, et al. Late Miocene tectonic in-version and hydrocarbon migration and accumulation in central and southern Xihu sag, East China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas; Geology*, 2005, 17(2): 73-79.]
- [18] Huang Baojia, Xiao Xianming, Hu Zhongliang, et al. Geochemistry and episodic accumulation of natural gases from the Ledong gas field in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 1689-1702.]
- [19] Wang Zhenfeng, Huang Baojia. Dongfang 1-1 gas field in the mud diapir belt of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25: 445-455.]
- [20] 任建业, 李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 203-213. [REN Jianye, LI Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the Western Pacific[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 203-213.]
- [21] Glasby G P, Notsu K. Submarine hydrothermal mineralization in the Okinawa Trough, SW of Japan: an overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23: 299-339.]
- [22] Nguyen Quoc Cuong, Antoni K Tokarski, Anna Świerczewska, et al. Late Tertiary tectonics of the Red River Fault Zone: Structural evolution of sedimentary rocks[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 69: 31-53.]
- [23] 熊斌辉, 张喜林, 张锦伟, 等. 西湖凹陷油气成藏的主控因素[J]. *海洋石油*, 2008, 28(2): 14-24. [XIONG Binhui, ZHANG Xilin, ZHANG Jinwei, et al. The key factor controlling hydrocarbon accumulation in Xihu Depression[J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(2): 14-24.]
- [24] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制油气晚期成藏[J]. *石油学报*, 2001, 22(2): 1-7. [GONG Zaisheng, WANG Guochun. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(2): 1-7.]
- [25] 米立军. 新构造运动与渤海海域上第三系大型油气田[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(1): 21-28. [MI Lijun. The Neotectonism and major Neogene oil and gas fields in Bohai sea[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2001, 15(1): 21-28.]
- [26] 侯方辉, 张志珣, 李三忠, 等. 南黄海新构造运动[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(11): 8-10. [HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, LI Sanzhong, et al. Brief discussion on Neotectonic move-

- ment of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21(11): 8-10.]
- [27] Ho-Shing Yu, Jinder Chow. Cenozoic basins in northern Taiwan and tectonic implications for the development of the Eastern Asian continental margin [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 131(1-2): 133-144.]
- [28] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上)[J]. *海洋石油*, 2004, 24(4): 6-14. [ZHAO Jinhai. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2004, 24(4): 6-14.]
- [29] 谢玉洪, 童传新. 崖城 13-1 气田天然气富集条件及成藏模式[J]. *天然气工业*, 2011, 31(8): 1-5. [XIE Yuhong, TONG Chuanxin. Conditions and pooling modes of natural gas accumulation in the Yacheng 13-1 Gas Field[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(8): 1-5.]
- [30] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [GONG Zaisheng, LI Sitian. Dynamic Research of Oil and Gas Accumulation in the Northern Margin Basins of South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2004.]
- [31] 翟光明. 中国石油地质志, 卷十六: 沿海大陆架及毗邻海域油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. [ZHAI Guangming. *Petroleum Geology of China: Vol. 16*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.]
- [32] 邓运华. 试论中国近海两个盆地找油与找气地质理论及方法的差异性[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(6): 1-11. [DENG Yunhua. A discussion on differences of hydrocarbon geology and applicable exploration theories and methods between two basin belts offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(6): 1-11.]
- [33] 邓运华. 试论中国近海两个坳陷带油气地质差异性[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 1-7. [DENG Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 1-7.]
- [34] 董伟良, 黄保家. 南海莺—琼盆地煤型气的鉴别标志及气源判别[J]. *天然气工业*, 2000, 20(1): 23-27. [DONG Weiliang, HUANG Baojia. Identification marks and source discrimination of the coal type gas in YGH and QDN Basins of South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(1): 23-27.]
- [35] Lijuan He, Kelin Wang, Liangping Xiong, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126: 211-220.]
- [36] 叶加仁, 吴景富, 舒誉, 等. 中国近海富烃凹陷油气成藏特征[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(5): 105-111. [YE Jiaren, WU Jingfu, SHU Yue, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the hydrocarbon-rich depressions, offshore China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(5): 105-111.]
- [37] 文志刚, 刁帆, 周东红, 等. 中国东部断陷盆地富油气凹陷评价体系探讨[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(2): 1-6. [WEN Zhigang, DIAO Fan, ZHOU Donghong, et al. Discussion on evaluation system for hydrocarbon-enriched depression in fault basins of Eastern China[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(2): 1-6.]
- [38] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(1): 81-86. [WANG Hongbin, ZANG Guangxue, YANG Muzhuang, et al. Structural circumstance of gas hydrate deposition in the continent margin, the South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 81-86.]
- [39] 吴时国, 姚根顺, 董冬冬, 等. 南海北部陆坡大型气田天然气水合物的成藏地质构造特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 324-328. [WU Shiguo, YAO Genshun, DONG Dongdong, et al. Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field of the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 324-328.]
- [40] 孙春岩, 吴能有, 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. [SUN Chunyan, WU Nengyou, NIU Binhua, et al. Geochemical characteristics of gaseous hydrocarbons and hydrate resource prediction in the Qiong-dongnan basin of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2007, 21(1): 95-100.]
- [41] 方银霞, 金翔龙, 杨树锋. 海底天然气水合物的研究进展[J]. *海洋科学*, 2000, 24(4): 18-21. [FANG Yinxia, JIN Xianglong, YANG Shufeng. Progress in marine gas hydrate study [J]. *Marine Science*, 2000, 24(4): 18-21.]
- [42] 孟宏伟, 刘保华, 石学法. 冲绳海槽中段西陆坡下缘天然气水合物存在的可能性分析[J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 629-633. [MENG Xianwei, LIU Baohua, SHI Xuefa, et al. Possibility of gas hydrate occurring in the western lower slope of Mid-Okinawa Trough [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 629-633.]
- [43] 梁锡武, 初凤友, 赵一阳, 等. 我国东海及邻近海域气体水合物可能的分布范围[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 315-319. [LU-AN Xiwu, CHU Fengyou, ZHAO Yiyang, et al. The possible distribution of hydrate gas in the area of East China Sea and its vicinity[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 315-319.]
- [44] 卢振权, 龚建明, 吴必豪, 等. 东海天然气水合物的地球化学标志与找矿远景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 77-81. [LU Zhenquan, GONG Jianming, WU Bihao, et al. Geochemical perspective of gas-hydrate in the East China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 77-81.]
- [45] Yin P, Berne S, Vagner P, et al. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2003, 194: 135-149.]
- [46] 王力锋, 汪集洋. 东海天然气水合物地热研究及其环境意义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 15-20. [WANG Lifeng, WANG Jiyang. A geothermal study of gas hydrates in the East China Sea and its environmental implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 15-20.]
- [47] 张洪涛, 张海启, 祝有海, 等. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J]. *中国地质*, 2007, 34(6): 953-961. [ZHANG Hongtao, ZHANG Haiqi, ZHU Youhai, et al. Gas hydrate

- investigation and research in China; Present status and progress[J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 953-961.]
- [48] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(1): 75-81. [ZHANG Guangxue, HUANG Yongxiang, ZHU Youhai, et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 75-81.]
- [49] 祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. *石油学报*, 2001, 22(5): 6-10. [ZHU Youhai, ZHANG Guangxue, LU Zhenquan, et al. Gashydrate in the South China Sea; background and indicators[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2001, 22(5): 6-10.]
- [50] 杨木壮, 沙志彬, 梁金强, 等. 南海东北部陆坡区天然气水合物成矿作用[J]. *现代地质*, 2011, 25(2): 340-348. [YANG Muzhuang, SHA Zhibin, LIANG Jinqiang, et al. Metallogenic conditions of gashydrate in the northeastern slope of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2011, 25(2): 340-348.]
- [51] 何家雄, 夏斌, 张启明, 等. 南海北部边缘盆地生物气和亚生物气资源潜力与勘探前景分析[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 167-180. [HE Jiexiong, XIA Bin, ZHANG Qiming, et al. Resources base and exploration potential of biogenic and sub-biogenic gas in marginal basin of the northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 167-180.]
- [52] 朱俊章, 蒋爱珠, 施和生, 等. 珠江口盆地白云凹陷深水区 LW3-1 气田有效气源区与运聚模式探讨[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(4): 25-31. [ZHU Junzhang, JIANG Aizhu, SHI Hesheng, et al. The effective gas-source area and gas migration-accumulation model in LW3-1 Gasfield, Baiyun Sag deep water area, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 25-31.]
- [53] 何家雄, 祝有海, 陈胜红, 等. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 237-243. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, CHEN Shenhong, et al. Genetic types and mineralization characteristics of gas hydrate and resources potential of Northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 237-243.]
- [54] 何家雄, 颜文, 马文宏, 等. 南海准被动陆缘深水油气与水合物共生意义[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(6): 5-10. [HE Jiexiong, YAN Wen, MA Wenhong, et al. The geological significance of the paragenetic association of hydrocarbon and hydrate in quasi-passive margin the northern south china sea[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2010, 32(6): 5-10.]
- [55] 雷新华, 林功成, 苗永胜, 等. 天然气水合物与传统油气资源共生藏模式初探[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(1): 47-52. [LEI Xinhua, LIN Gongcheng, MIAO Yongsheng, et al. Accumulation coexistence models of natural gas hydrate and conventional hydrocarbon: An approach[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(1): 47-52.]

EPISODIC TECTONIC EVOLUTION, BASIN TYPES AND HYDROCARBON ACCUMULATION IN CHINESE MARGINAL BASINS

HE Jiexiong¹, ZHANG Wei¹, YAN Wen¹, LU Zhenquan², ZHANG Jingru¹, GONG Xiaofeng¹

(1 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Mineral Resources Research Institute, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Chinese marginal basins, located in the most active region where the Eurasia plate, India-Australia plate and the Pacific plate converge, have suffered multiphase tectonic activities since Paleocene, especially strong neotectonic movements since Miocene. Under such a regional geological background, Chinese marginal basins are characterized by episodic tectonic evolution, and a “trench-arc-basin” system is gradually formed that resulted in the formation of a series of Cenozoic basins with fault-depression structure in shallow and deep waters, in which filled with medium to deep water lacustrine facies and source rocks in the early faulting stage of Paleogene, coal measures and source rocks in the late faulting stage and marine deposits and source rocks in the stage of Neogene. The evolutionary history laid a solid material foundation for hydrocarbon generation. The subsidence-depositional centers of marginal basins gradually migrated with time from continent to ocean, are favorable for the formation of multiple reservoir-seal assemblages. The temporal and spatial intercoupling with neotectonic movement and hydrocarbon supply system become the major factor which affects the hydrocarbon accumulation in marginal basins.

Key words: marginal basins; tectonic evolution characteristics; the inner and outer belts of margins; inside-oil fields and outside-gas fields in space; vertical hydrocarbon distribution