

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.01073

南海北部陆缘盆地群新生代构造过程与油气运聚规律

王洪才^{1,2}, 李三忠^{1,2}, 刘鑫^{1,2}, 索艳慧^{1,2}, 戴黎明^{1,2}, 程世秀^{1,2}, 许立青^{1,2}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:南海北部陆缘盆地群包括莺歌海盆地、北部湾盆地、琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地,均处于复杂的构造环境下,盆地的形成及演化与周围的构造过程息息相关。本文对新生代 55 Ma 以来的典型时期海陆格局进行了重建,在此基础上对南海北部陆缘各盆地的油气运聚规律进行探讨,提出:(1)太平洋板块与欧亚板块、印度-澳大利亚板块与欧亚板块相互作用可以从多方面影响油气的运移。(2)自西向东,由琼东南盆地到珠江口盆地烃源岩时代相对变老埋深变大,地幔埋深也逐渐变大,生烃能力逐渐提高;自北向南,北部湾盆地、珠江口盆地和琼东南盆地的地幔平均埋深也有逐渐变深的趋势。(3)莺歌海盆地、琼东南盆地和珠江口盆地南部成为天然气富集区的原因是由于这些区域构造活动相对较微弱,拗陷幅度小,长期处于沉降速率小的条件下,而且地壳非常薄(Moho 面埋深均低于 24 km),地温梯度及大地热流值偏高,有利于形成烃源岩有机质热演化多处在成熟-高熟凝析油及湿气阶段。(4)琼东南盆地和珠江口盆地具有更好的油气前景。具体来说琼东南盆地和珠江口盆地南部可成为该区极具潜力的天然气产区,而珠江口盆地北部则具有极大的石油开发潜力。

关键词:盆地群;海陆格局重建;构造过程;油气运聚;南海北部

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2013)01-0073-10

南海北部包括莺歌海盆地、北部湾盆地、琼东南盆地、珠江口盆地以及台西南盆地等众多盆地。至今研究区的油气勘探已获重大进展,陆续发现了多个大中型油气田,初步形成了南海北部油气分布的整体格局,但其油气勘探程度还有很大提高的空间,很多地质规律及特点有待进一步深化认识与系统总结。从板块尺度来看,这些盆地的形成与演化受到太平洋板块、印度-澳大利亚板块与欧亚板块之间相互作用的影响,自新生代以来东亚和东南亚地区发生了一系列的重大变化,如太平洋板块晚白垩世以来由早期向 NWW 方向转变为向 NNW 方向俯冲,印度-澳大利亚板块由 50 Ma 以来的快速向北运动转变为 35 Ma 的慢速向北运动,青藏高原 3—4 幕不同速率的隆升事件,欧亚板块南缘晚白垩世到 16 Ma 期间向 SE 方向以及向南张裂,34~15 Ma 南海的打开与形成演化,16 Ma 菲律宾海板块向北快速推移和旋转,5 Ma 以来台湾强烈的造山事件,此外在某些时期局部还存在洋中脊俯冲事件,这些事

件不仅导致了研究区及邻区的海-陆格局的重大变化,而且也影响该区盆地内部地质过程。从盆地尺度来看,研究区盆地的构造特征和沉积充填样式受该区大地构造背景和上述构造事件的影响显著,并导致了盆地内独特的油气运移聚集规律。

南海北部大陆边缘盆地构造受南海演化以及邻区构造事件的联合控制。因此,本文重建南海及其周边地区新生代以来关键阶段的海-陆格局,作为总结分析该区的构造演化和古应力场的基础,并探讨相关大地构造背景制约下的区域应力场变化导致的盆地内部构造格局及其引起的生储盖配置和宏观油气运聚规律。

1 南海北部陆缘及其周边海陆格局重建与构造演化

1.1 55~35 Ma

通过重建表明,距今 55 Ma 左右,印度大陆逐渐向北运动,西侧先与欧亚大陆开始点碰撞(图 1 下)。侯增谦等^[1]根据构造-岩浆事件的时空分布、岩石组合特征、岩石地球化学以及岩浆演变序列认为,印度板块与欧亚板块在 65 Ma 以前已经发生碰撞,55 Ma 左右印度板块已经向欧亚板块之下俯冲并发生地壳深融作用。55~50 Ma 是印度大陆与欧

基金项目:国家自然科学基金项目(41072152);海洋“863”重点项目(2009AA093401)

作者简介:王洪才(1986—),男,硕士生,从事构造地质学与海洋地质学的学习与研究,E-mail:hongcaiwang@hotmail.com

通讯作者:李三忠(1968—),博士,教授,博导,从事构造地质学及海洋地质学的教学和研究工作,E-mail:sanzhong@ouc.edu.cn

收稿日期:2012-09-10;改回日期:2012-10-13. 周立君编辑

亚大陆相互作用最强烈的时期^[2],其俯冲深度达到了 80~100 km^[3]。同时,西菲律宾海盆开始扩张,其中央盆地 NW 走向的洋中脊最早张开时间在 56.7 Ma,与之相对应的是中国东部大陆火山作用源区的急剧转化^[4]。此时,两条俯冲带发育于研究区中,位于研究区西面的是巽它-爪哇海沟,而东面的则是日本海沟-小笠原海沟-马里亚纳海沟。两者的形成演化分别与印度板块向 NE 的俯冲和太平洋板块向西的俯冲相联系。同时,南海海盆尚未开启,而古南海开始向 SE 俯冲。作为古太平洋板块向 NW 俯冲而形成的多扩张中心弧后盆地中的一个,古南海大约在始新世-渐新世开始自西向东剪刀式封闭,至中新世完全消亡^[1]。

在印度板块与太平洋板块的共同作用下,南海北部陆缘总体处于复杂的右旋张扭性构造应力场之中,珠江口盆地形成了以半地堑为基本构造单元或由半地堑组合而形成一系列 NE—NEE 向拗陷带^[5]。在太平洋板块的 NWW—NW 俯冲以及红河断裂早期左旋走滑作用下,琼东南盆地内主要发育了 NEE—NE、NNE 向断裂,这些基底断裂将琼东南盆地分割为以 NEE—近 EW 向为主的众多小断陷^[6]。

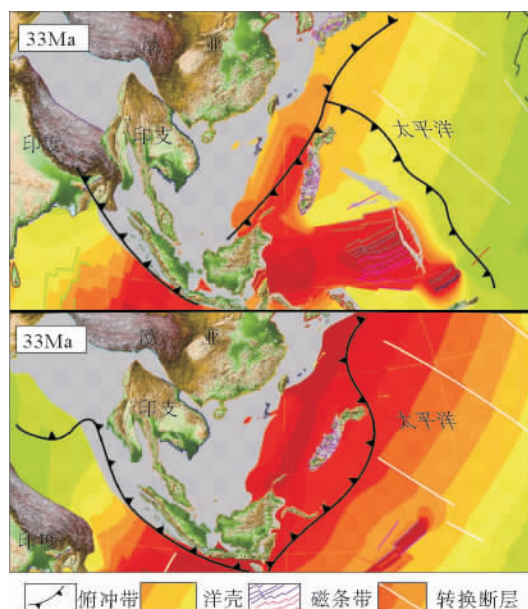


图1 55 Ma 和 33 Ma 南海北部陆缘及其周边古地理重建

Fig. 1 Reconstruction of the northern continental margin of the South China Sea for 55 Ma and 33 Ma

1.2 35~25 Ma

33 Ma 古南海仍然在向南海俯冲于加里曼丹岛、

巴拉望岛和吕宋岛之下,由于其俯冲的作用以及太平洋板块向欧亚板块之下俯冲的影响(图 1 上),巴拉望岛发生逆时针的转动,这使得古南海的封闭时间表现出 SW 早、NE 晚的剪刀状特征^[7]。西菲律宾海盆地进一步扩张,并顺时针旋转。其西面靠近加里曼丹岛的周围,苏拉威西海也已经开始扩张。

此时,在研究区的西边,印度板块仍然在向欧亚大陆挤压,在这段时间内,印度-欧亚板块的汇聚速率快速减慢,从约 90 mm/a 骤减到约 60 mm/a^[8],两板块之间的挤压直接导致陆内俯冲、走滑剪切和块体旋转。这种汇聚速率的变化可能标志着印度大陆以低角度俯冲到亚洲大陆之下或陆-陆碰撞导致降速^[9]。青藏高原东缘发育大规模走滑剪切和块体旋转,同时伴随强烈的钾质岩浆活动,其峰期年龄集中于 35 Ma^[10],其后,两大陆转为强烈的陆内汇聚时期^[2]。

研究区深部,相对高温的地幔所影响的范围逐渐集中到南海及海南岛的区域。这种集中的趋势可能与欧亚板块、印度板块和菲律宾海板块之间的相互汇聚导致的地幔流有关。许多层析成像的结果也都支持海南地幔柱的存在,而且发现南海地幔柱的管道从地表往下向 SE 方向倾斜^[11]。南海经历了第一阶段的扩张。研究区内的主要断层,尤其是红河剪切带的演化也受到该地幔柱的影响,大多数学者认为红河剪切带开始左旋剪切的时间大约为 34~31 Ma,Tapponnier^[12]认为南海的形成正是由于红河断裂带的左行活动而形成的,然而,随后印支地块的挤出和旋转却并不如该模式所解释的由印度板块的挤压造成的,而是在华南地块和印度板块的共同作用下造成的^[13]。

研究区断裂主要有 3 组:NE, NEE—EW 和 NW 向。NE 向断裂的活动时间最早,从晚白垩世开始活动;NEE—EW 向断裂次之,从晚始新世开始活动;NW 向断裂的活动时间最长,到第四纪还在活动^[14]。

1.3 25~15 Ma

25 Ma 左右,菲律宾海板块以 3.5 cm/a 的速度向 NW 运动。同时,伊豆-小笠原-马里亚纳海沟向东后退,在约 25 Ma 时形成了 NW 轴向的四国-帕里西维拉海盆(图 2 下)^[15],菲律宾海板块由 SE 向 NWW 方向快速运动,导致欧亚板块东南缘出现大规模右行走滑断裂系统,其南端沿俯冲带班达弧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,俯冲带逐步变成了

左旋走滑断裂,印支地块仍在向 SE 方向挤出^[16]。此时,南海扩张脊发生了一次向南跃迁的过程,并且扩张脊走向从近东西向转变为 NE—SW 向,西南海盆开始扩张^[17]。姚伯初^[18]认为,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 SE 方向的地幔流,受到向西部俯冲的太平洋板块的阻挡,而转向南流动。

中中新世以前,巴拉望地块与加里曼丹—卡加延地块开始碰撞,之后两者碰撞加强,导致苏禄海向南俯冲(图 2 上),该过程持续到距今约 10 Ma。

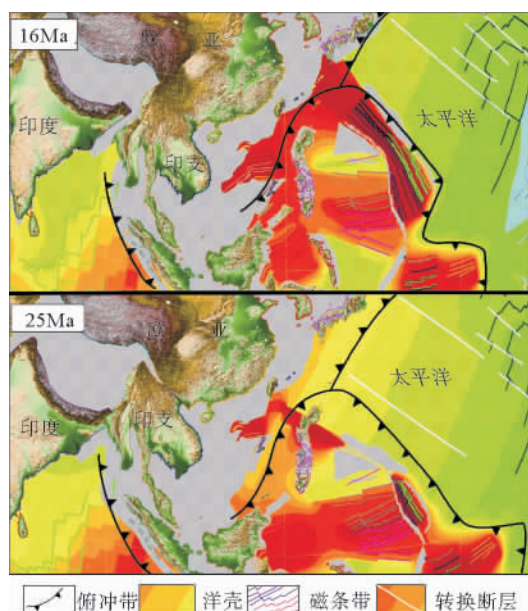


图 2 16 Ma 和 25 Ma 南海北部陆缘及其周边古地理重建

Fig. 2 Reconstruction of the northern continental margin of the South China Sea for 16 Ma and 25 Ma

2 南海北部陆缘构造应力场

南海北部陆缘处于太平洋、欧亚和印度—澳大利亚三大板块的联合控制之下,同时还受到南海扩张和菲律宾海板块、印支地块旋转等小规模局部事件的影响,因而其应力场比较复杂。本文根据海—陆格局重建以及前人对该区构造应力场的相关研究,对本区的新生代构造应力场系统总结如下。

距今约 55 Ma 太平洋板块向欧亚板块的俯冲速度加快,俯冲方向为 N—NNW。中始新世末期,太平洋板块运动方向由 N—NNW 向变为 NW—NNW 向,而且其俯冲角度变大,运动速度也达到最

高。约 33 Ma,运动俯冲方向仍为 NWW,运动速度降低,板块内的火山活动也减弱。35 Ma 前后,印度板块在碰撞和推挤过程中运动方向由 NE 转向 NNE。30~25 Ma,太平洋板块内的火山作用增强,随后洋壳的扩张速度降低到最低点^[19],与此同时,印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞,地幔物质向东流动,但是受到东部向欧亚板块俯冲的太平洋板块的阻挡而向南运动^[18],造成研究区 SE—NW 向的伸展。15 Ma 左右菲律宾海板块逆时针旋转与欧亚板块的卡加延脊以及巴拉望发生碰撞,导致苏禄小洋盆向苏禄弧俯冲^[18,20]。

古南海在始新世向 SE 俯冲,导致研究区东南方向俯冲带方向翻转,研究区处于伸展背景。始新世—渐新世,古南海自西向东封闭。此时南海西部边缘的红河断裂处于左行走滑的运动状态,二者的共同作用形成 SN 向伸展,成为南海扩张的动力。17 Ma 左右,印支地块顺时针旋转,澳大利亚板块快速向北转移,古南海完全封闭,北巴拉望地块与西菲律宾板块碰撞,南海停止扩张^[21]。

3 油气运聚特征

根据上述南海北部盆地群形成和演化的区域构造应力场背景,综合前人对于该区的石油地质勘探与研究,可以进一步探讨由单个盆地到整个南海北部陆缘的油气运聚规律。南海北部陆缘盆地的分布及基本的构造单元如图 3 所示。莺歌海盆地呈 NNW 向延伸,其余四个盆地均呈 NEE—NE 向延伸。

3.1 莺歌海盆地

莺歌海盆地位于南海北部西侧,是一个天然气富集的走滑—伸展盆地(图 4)。盆地内天然气主要来源于中新统梅山组、三亚组烃源岩,最大埋深达 5 000~6 000 m。这两套地层在大约 23 Ma 开始沉积,此时南海洋壳开始第二幕扩张,并且印支地块发生顺时针旋转向欧亚板块拼合,红河断裂发生左行走滑运动,但是运动速率减慢^[22]。通过对沉降速率的统计认为,中中新世盆地的沉降中心向南迁移^[23-24]。这段时期内的沉降并非一般伸展盆地中主要受到热冷却作用的控制,而且受到中下地壳岩石圈的韧性伸展作用的控制^[24],之后盆地快速沉降,形成下中新统三亚组和中中新统梅山组两套烃源岩。

在莺歌海盆地,储层和盖层主要有两种组合:

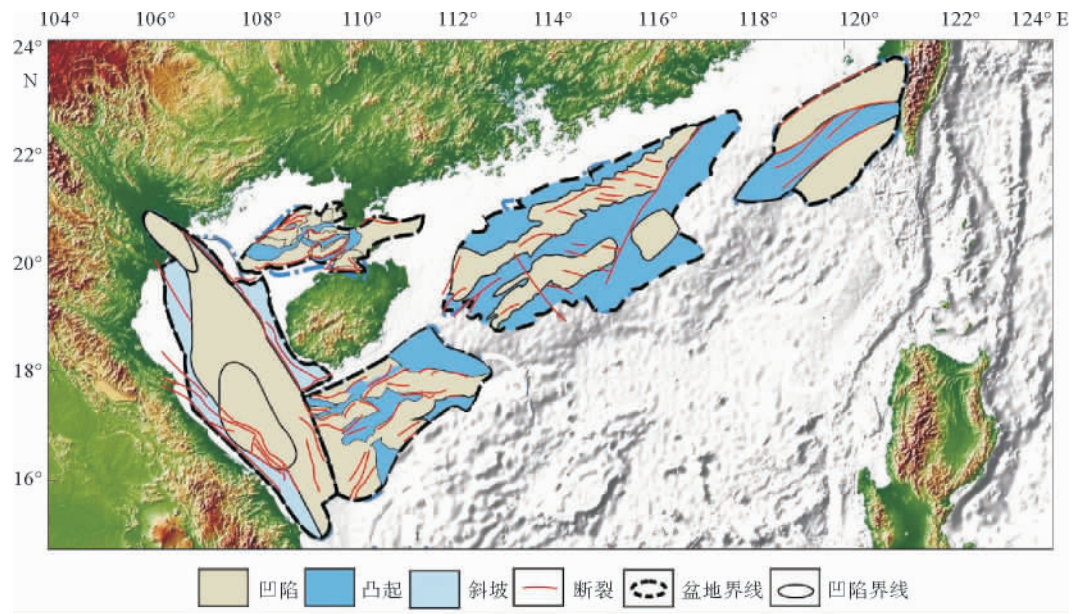


图 3 南海北部盆地群分布格局

Fig. 3 Distribution of basins along the northern continental margin of the South China Sea

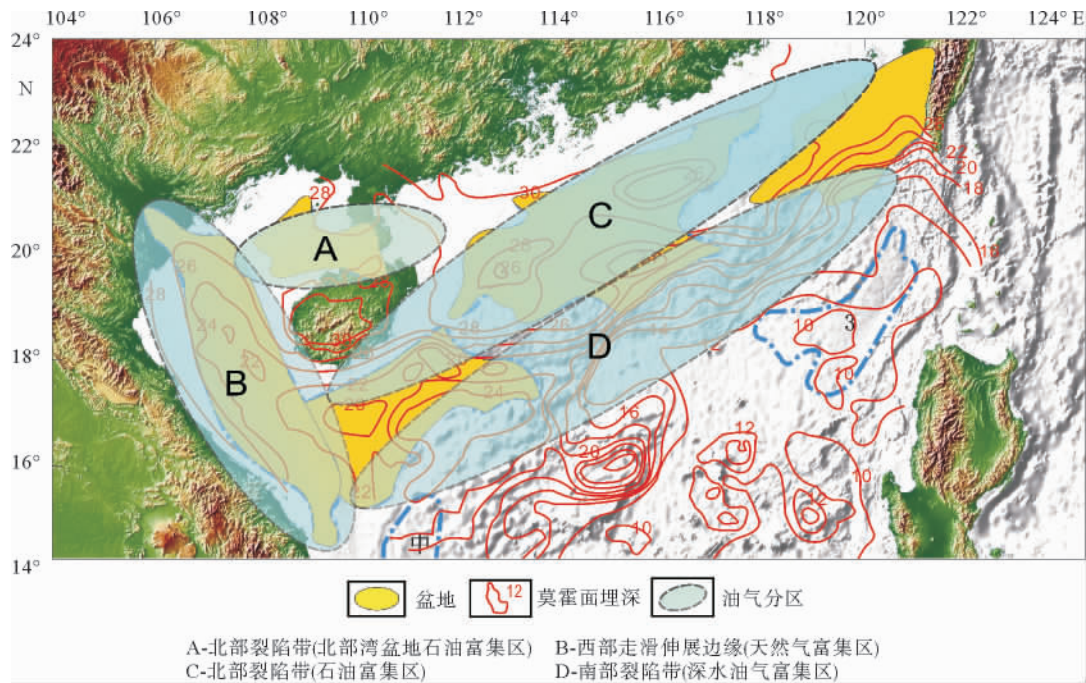


图 4 南海北部边缘莫霍面埋深与油气分布关系

Fig. 4 Relationships of Moho depths and hydrocarbon distribution in the northern continental margin basins of South China Sea

(1)下中新统三亚组及其相邻层段的滨海、扇三角洲砂岩为储层, 三亚组中上部及中中新统梅山组的浅海-半深海相泥岩为区域性盖层;(2)上中新统黄流组及其相邻层段的滨海、各种成因类型的三角洲、浊积砂为储层, 上新统莺歌海组二段的浅海-半深海相泥岩为盖层^[25]。

中新世晚期的泥底辟热流体活动是莺歌海盆地

天然气运聚成藏的主导因素和控制条件, 一方面为中中新统烃源岩快速成熟生烃提供了热力学和成藏动力学条件, 另一方面形成了油气的运移通道及疏导系统^[26-29]。这些底辟构造被认为是在盆地内部应力释放背景下, 早期快速沉降埋藏形成的三亚组-梅山组欠压实泥岩及其排出的流体沿地层破碎带上升形成的^[24]。

总而言之,莺歌海盆地快速沉积的地质环境和较高的地温梯度^[30]等特点促使该盆地形成大量的气源岩,产生大量的气态烃。断层的活动性与油气的聚集和逃逸密切相关。莺歌海盆地断层晚期活动性较弱,加之气藏形成较晚,气源充足,因此,通过底辟构造形成的油气藏能够得以保存^[31]。

3.2 北部湾盆地

北部湾盆地位于粤桂古生代褶皱带和海南褶皱带之间^[32],是研究区重要的石油富集区(图 4)。自北向南分为北部隆起、中部坳陷及南部隆起等 3 个一级构造单元,其新生代构造演化可分为古近纪断陷和新近纪坳陷两大阶段^[33]。

盆地内主要发育有两套烃源岩,分别是始新统流沙港组暗色泥页岩与渐新统涠洲组暗色泥岩及煤系泥岩^[32,34-35]。其中,流沙港组二段沉积时期是构造作用最强烈的时期,NE 和 NEE 向断裂控制了烃源岩的发育^[33]。钻井资料表明,北部湾盆地古近系属浅海、滨海相沉积,储层普遍发育^[35]。断裂的活动沟通烃源岩与圈闭,因而控制油气的生成、运移和聚集^[36]。NEE 向断层控制了流沙港组二段烃源岩的分布,EW 向断层控制了涠洲组烃源岩的分布^[37],断裂活动还控制了多种类型圈闭,包括披复背斜和滚动背斜、断背斜、断块及古潜山和生物礁滩等,继承性活动的断裂为油气垂向运移提供了主要的运移通道,油气沿主运移通道向南运聚成藏^[29,33]。

盆地内断裂发育,断裂活动过程对油气的运聚具有重要的控制作用^[33,38]。裂陷期有三期断裂活动,形成了 NE 和 NEE 向伸展断裂以及 NNE 向走滑伸展断层。拗陷期最大主应力方向发生改变而导致古近纪发育的断层终止于古近系,北部湾盆地北部缓慢的整体沉降^[39]。

北部湾盆地的形成与演化主要受太平洋板块以及古南海的俯冲和印度-澳大利亚板块的碰撞影响。古新世太平洋板块向欧亚板块俯冲减慢,导致研究区初始伸展作用。渐新世古南海向南俯冲产生的拖曳力使盆地继续伸展,而北部湾盆地 NWW—NW 向的形成则与印度-澳大利亚板块的碰撞和后期华南的挤出有联系^[37]。

3.3 琼东南盆地

琼东南盆地是南海北部陆缘的新生代盆地,是我国重要的深水油气富集区(图 4)。对其内部层序及断裂特征的研究,盆地的新生代演化主要分为晚

白垩世-晚渐新世多幕裂陷、早中新世-中中新世区域热沉降和晚中新世以来的新构造运动^[6]。

盆地内的主要烃源岩为渐新统崖城-陵水组近海含煤岩系,储层、盖层的纵向分布主要受控于海平面升降和构造运动,其横向分布的主要控制因素是物源和沉积环境^[40-42]。主要的生、储、盖组合有 3 套,分别为(1)断陷裂谷期上渐新统陵三段三角洲砂岩、滨浅海相砂岩储层与上覆陵二段泥岩盖层;(2)拗陷早期下中新统三亚组海相砂岩、碳酸盐台地灰岩储层,上覆梅山组高压海相含钙泥岩盖层;(3)拗陷晚期上中新统黄流组或上新统莺歌海海相粉细砂岩或碳酸盐储层,上覆上新统莺歌海组海侵泥岩盖层^[40,43]。

晚白垩世至晚渐新世是盆地发育的多幕裂陷阶段,三次裂陷活动分别沉积了始新统、下渐新统崖城组以及上渐新统陵水组三套地层^[6]。新生代古南海向东南方向的俯冲可能是研究区 NE 向裂陷作用的动力^[44]。印度-澳大利亚板块与欧亚板块碰撞导致盆地内部形成 NW 向断层,太平洋板块的俯冲则导致了 NE 向断裂的形成^[45]。早中新世-中中新世,南海海盆的扩张停止,盆地进入区域热沉降期。此时盆地沉降较缓慢,断裂活动微弱,甚至发展为隐伏断层^[46]。晚中新世以来,琼东南盆地在地幔上涌活动的作用下由慢速沉降转变为快速沉降,同时新发育 NWW—NW 向断裂,而且继承断层表现出张扭性,但活动性弱于断陷期^[47]。

新生代盆地内的深大断裂活动均相对较弱,纵向上最深切穿至下中新统三亚组地层,局部仅切穿新近系地层,与古近系烃源供给相脱离,限制了油气的纵向运聚,而促使油气侧向运聚相对活跃^[43]。

3.4 珠江口盆地

珠江口盆地是位于南海北部陆缘的中新生代盆地,主要由北部断阶带、北部裂陷带、中央隆起带、南部裂陷带和南部隆起带 5 个构造单元组成。^[48]其油气分布和上述 3 个盆地有所不同,北部为石油富集区,南部为天然气富集区(图 4)。

盆地内新生代发育的烃源岩主要有两套,即始新统文昌组中深湖相和下渐新统河湖沼泽相煤系以及湖相,均是盆地晚白垩世至渐新世早期裂陷阶段的产物。主要的储盖组合有 4 套,分别是始新统文昌组河流相及滨浅湖相砂岩储层及其储盖组合、上渐新统珠海组浅海三角洲砂岩储层及其储盖组合、下中新统珠江组深水扇及碳酸盐岩台地礁滩储层及其储盖组合和中中新统及上新统半深海相浊流沉积

及深水沉积体系砂岩储层及其储盖组合^[49]。

新生代早期,珠江口盆地处于裂陷期,北部裂陷带已经开始形成,早中始新世的珠琼运动使盆地形成分隔的南北断陷^[50],整个裂陷期的构造运动形成了南北分带、东西分块的构造格局。渐新世末期,印度板块持续向欧亚板块挤压而导致南海运动,珠江口盆地沉降加剧并接受海陆交互相沉积,沉降速率较快。随后,盆地进入热冷却沉降阶段,构造沉降速率降低,形成了较好的储盖组合。晚中新世到上新世,由于菲律宾板块与欧亚板块的碰撞,盆地内的断块发生抬升或者下降,断层开始活动,又产生 NWW 向张扭性断层^[49,51-52]。

盆地内断层(NWW、EW、NE)以伸展构造样式为主,这些断层的活动,为油气向上的垂向运移提供了良好的通道,然而断层并不能完全穿透全部地层而到达地面,最前到达恩平组湖泊-沼泽相泥岩与砂岩上覆的三角洲相和滨岸相沉积,油气只能通过疏导层及不整合面侧向运移^[31]。

由于盆地北部的裂陷带断陷规模小,地温梯度及大地热流偏低^[5],构造活动较为强烈,地幔埋深大,而且烃源岩具有较高的生烃潜能,所以容易进入液态烃为主的阶段,以产生大量的石油为主^[53];盆地的南部拗陷幅度小,拗陷速度梯度小,长期处于拗陷速度小的条件下^[53],而且地壳非常薄,地温梯度及大地热流值偏高,烃源岩有机质热演化多处处在成熟-高熟凝析油及湿气阶段^[5],更有利于形成天然气。因而,珠江口盆地形成了“北油南气”的格局。

4 结论

(1)太平洋板块与欧亚板块、印度-澳大利亚板块与欧亚板块相互作用可以从多方面影响油气的运移。首先,相互作用是形成研究区盆地基本格局的动力因素,能够解释研究区内(除莺歌海盆地)盆地基本呈北东向拉伸,并沿北东向排列,同时盆地内的断裂分布也是在这一构造背景下形成,这就决定了盆地的凹陷分布以及沉积样式。其次,相互作用的强烈程度直接决定了地壳的厚度分布,即地温梯度的高低,从而决定烃源岩的类型和演化。后期的相互作用直接影响断层的活动性,而断层的活动性又决定着油气的保存与逃逸。

(2)自西向东,由琼东南盆地到珠江口盆地烃源岩时代相对变老、埋深变大,热流值逐渐变大,生烃能力逐渐提高;自北向南,北部湾盆地、珠江口盆地和琼东南盆地的莫霍面平均埋深也有逐渐变深的趋

势,烃源岩埋深变大,地幔埋深变大,热流值变大,生烃能力提高。

(3)莺歌海盆地、琼东南盆地和珠江口盆地南部成为天然气富集区的原因是由于这些区域构造活动相对较微弱,拗陷幅度小,拗陷速度梯度小,长期处于拗陷速度小的条件下,而且地壳非常薄(莫霍面埋深均低于 24 km),地温梯度及大地热流值偏高,有利于形成烃源岩有机质热演化多处处在成熟-高熟凝析油及湿气阶段。

综合上述分析,本文认为琼东南盆地和珠江口盆地有更好的油气前景。琼东南盆地和珠江口盆地南部可成为该区极具潜力的天然气产区,而珠江口盆地北部则具有极大的石油开发潜力。

参考文献 (References)

- [1] 侯增谦,莫宣学,高永丰,等. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1233-1248. [HOU Zengqian, MO Xuanxue, GAO Yongfeng, et al. Early Processes and Tectonic Model for the Indian-Asian Continental Collision-Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1233-1248.]
- [2] 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等. 印度大陆和欧亚大陆的碰撞时代[J]. 地球科学进展, 2004, 19(04): 564-571. [ZHU Dicheng, PAN Guitang, MO Xuanxue, et al. The age of collision between India and Eurasia [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(4): 564-571.]
- [3] 张泽明,郑来林,王金丽,等. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80~100km 深度的证据[J]. 地质通报, 2007, 26(1): 1-12. [ZHANG Zeming, ZHENG Lailin, WANG Jinli, et al. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80~100 km depth [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(1): 1-12.]
- [4] 朱炳泉,王慧芬,陈毓蔚,等. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 213-221. [ZHU Bingquan, WANG Huifen, CHEN Yuwei, et al. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2002, 31(3): 213-221.]
- [5] 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 Shenghong, 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.]

- [6] 赵民,张晓宝,吉利明,等. 琼东南盆地构造演化特征及其对油气藏的控制浅析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 494-502. [ZHAO Min, ZHANG Xiaobao, JI Liming, et al. Characteristics of tectonic evolution in the Qiongdongnan Basin and brief discussion about its controlling on reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 494-502.]
- [7] 吴世敏,周蒂,刘海龄,等. 南沙地块构造格局及其演化特征[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 23-28. [WU Shimin, ZHOU Di, LIU Hailing, et al. Tectonic framework and evolution characteristics of Nansha Block, South China Sea [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2004, 28(1): 23-28.]
- [8] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region [J]. Tectonophysics, 1994, 235(1-2): 149-180.
- [9] 周蒂,吴世敏,陈汉宗,等. 南沙海区及邻区构造演化动力学的若干问题[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 339-345. [ZHOU Di, WU Shimin, CHEN Hanzong, et al. Some remarks on the tectonic evolution of Nansha and its adjacent regions in southern South China Sea [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2005, 29(3): 339-345.]
- [10] 侯增谦,潘桂棠,王安建,等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521-543. [HOU Zengqian, PAN Guitang, WANG Anjian, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 521-543.]
- [11] Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes[J]. Earth Planet Sci. Lett., 2001, 192(3): 251-265.
- [12] Tapponnier P, Pelzer G, Armijo P. On the mechanics of the collision between India and Asia[C]//Collision Tectonics. J. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 1986, 19(1): 115-157.
- [13] 张连生,钟大赉. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. 地质科学, 1996, 31(4): 327-341. [ZHANG Liansheng, ZHONG Dalai. The Red River strike-slip shear zone and Cenozoic tectonics of East Asia continent [J]. Chinese Journal of Marine Geology, 1996, 31(4): 327-341.]
- [14] 姚伯初. 东南亚地质构造特征和南海地区新生代构造发展史[J]. 南海地质研究, 2000(11): 1-13. [YAO Bochu. The Geological tectonic characteristics in SE Asia area and Cenozoic tectonic history in the South China Sea [J]. Geological South China Sea, 2000(11): 1-13.]
- [15] 臧绍先,宁杰远. 菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用及其对东亚构造运动的影响[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 188-197. [ZANG Shaoxian, NING Jieyuan. Interaction between Philippine Sea Plate(PH) and Eurasia(EU) plate and its influence of the movement Eastern Asia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 188-197.]
- [16] 姚伯初,杨木壮. 南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 93-100. [YAO Bochu, YANG Muzhuang. Tectonic movements in the Late Cenozoic and gas hydrate resources in the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(4): 93-100.]
- [17] 谢建华,夏斌,张宴华,等. 南海形成演化探究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 212-218. [XIE Jianhua, XIA Bin, ZHANG Yanhua, et al. Study on Formation and Evolution of the South China Sea [J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 212-218.]
- [18] 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, et al. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area [J]. Chinese Geology, 2004, 31(2): 113-122.]
- [19] 林长松,高金耀,虞夏军,等. 南海北部新生代的构造运动特征[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 81-86. [LIN Changsong, GAO Jinrao, et al. Characteristics of tectonic movement in the northern part of South China Sea during the Cenozoic [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 81-86.]
- [20] Hall R. Cenozoic plate tectonics reconstructions of SE Asia [C]//In: Matthews A J. et al. Petroleum Geology of Southeast Asia. Geol. Soc. Special Publ, 1997, 126: 1-23.
- [21] 栾锡武,张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 59-74. [LUAN Xiwu, ZHANG Liang. Tectonic evolution modes of South China Sea: Passive Spreading Under Complex Actions [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(6): 59-74.]
- [22] 孙珍,钟志洪,周蒂,等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 1-9. [SUN Zhen, ZHONG Zhihong, ZHOU Di, et al. Deformation mechanism of Red River Fault Zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin Formation [J]. Tropic Oceanology, 2003, 22(2): 1-9.]
- [23] 龚再生,李思田. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 88-104. [GONG Zaisheng LI Sitian. The Research of Oil and Gas Accumulation Kinetics in the Continental Margin Basin of Northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 88-104.]
- [24] 王雅明,佟殿君,任建业. 印支地块的逃逸旋转与莺歌海盆地的发育演化[J]. 断块油气田, 2007, 14(2): 33-35, 91. [WANG Yaming, TONG Dianjun, REN Jianye, et al. Extrusion and rotation of Indochina block and development and evolutional process of Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14(2): 33-35, 91.]
- [25] 万志峰,夏斌,蔡周荣,等. 南海北部油气成藏区带的划分与勘探前景[J]. 天然气工业, 2010, 30(8): 4-8. [WAN Zhifeng, XIA Bin, CAI Zhourong, et al. Plays division and exploration potentials in the northern South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8): 4-8.]
- [26] 何家雄,陈红莲,陈刚,等. 莺歌海盆地泥底辟带天然气成藏条件及近期勘探方向[J]. 中国海上油气, 1995, 9(3): 157-163. [HE Jiaxiong, CHEN Honglian, CHEN Gang, et al. Gas reservoir and exploration targets of Mud Diapire Belt, Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(3): 157-163.]

- [27] 何家雄,陈伟煌,钟启祥. 莺歌海盆地泥底辟特征及天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(6): 6-9. [HE Jiaxiong, CHEN Weihuang, ZHONG Qixiang, et al. Mud diapire characteristics and natural gas prospects in Yinggehai Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(6): 6-9.]
- [28] 何家雄,黄火尧,陈龙操. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 120. [HE Jiaxiong, HUANG Huoyao, CHEN Longcao, et al. The Formation and Evolution [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(3): 120.]
- [29] 何家雄,陈胜红,刘海龄,等. 南海北部边缘区域地质与油气运聚成藏规律[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(5): 46-52. [HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, LIU Hailing, et al. Geological Characteristics and the law of Formation of hydrocarbon migration on accumulation, Northern South China Sea [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(5): 46-52.]
- [30] 汪维安,邓孝,陈墨香,等. 南海北部大陆架西段地热条件与油气资源前景[J]. 地质科学, 1996, 31(4): 416-428. [WANG Ji'an, DENG Xiao, CHEN Moxiang, et al. Geothermal conditions and hydrocarbon prospects in west sector shelf of Northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(4): 416-428.]
- [31] 蔡周荣,夏斌,万志峰,等. 珠江口盆地与莺歌海盆地油气运聚特征的差异性[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 9-12. [CAI Zhourong, XIA Bin, WAN Zhifeng, et al. Differences in hydrocarbon migration and accumulation between the Pearl River Mouth and the Yinggehai-Qiongdongnan basins on the northern margin of South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 9-12.]
- [32] 刘明全. 北部湾盆地天然气成藏系统构想[J]. 中国海上油气, 2004, 16(2): 22-26. [LIU Mingquan. The assumed gas accumulation systems in Beibuwan Basin [J]. China Offshore Oil, 2004, 16(2): 22-26.]
- [33] 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.]
- [34] 张启明,苏厚熙. 北部湾盆地油气藏类型及其分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(4): 55-65. [ZHANG Qiming, SU Houxi. Types and distribution laws of hydrocarbon reservoir in Beibu Gulf Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1986, 6(4): 55-65.]
- [35] 张启明,苏厚熙. 北部湾盆地石油地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(3): 73-82. [ZHANG Qiming, SU Houxi. Petroleum Geology of the Beibu Gulf Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1989, 9(3): 73-82.]
- [36] 于俊吉,罗群,张多军,等. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 241-248. [YU Junji, LUO Qun, ZHANG Duoju, et al. Characteristics of faults in the Fushan Depression of Hainan, the Beibuwan Basin and their controlling roles to hydrocarbon pool-formation [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2004, 26(3): 241-248.]
- [37] 徐建永,张功成,梁建设,等. 北部湾盆地古近纪幕式断陷活动规律及其与油气的关系[J]. 中国海上油气, 2011, 23(6): 362-368. [XU Jianyong, ZHANG Hongcheng, LIANG Jianshe, et al. Paleogene activities of episodic rifting and their relationships with hydrocarbon in Beibuwan Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6): 362-368.]
- [38] 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.]
- [39] 魏春光,何雨丹,耿长波,等. 北部湾盆地北部坳陷新生代断裂发育过程研究[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 28-35. [WEI Chunguang, HE Yudan, GONG Changbo, et al. Faulting mechanism in northern depression of the Beibuwan Basin [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2008, 32(1): 28-35.]
- [40] 万志峰,夏斌,何家雄,等. 南海北部莺歌海盆地与琼东南盆地油气成藏条件比较研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 648-652. [WAN Zhifeng, XIA Bin, HE Jiaxiong, et al. The comparative study of hydrocarbon accumulation conditions in Yinggehai and Qiongdongnan Basins, Northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 648-652.]
- [41] 马文宏,何家雄,姚永坚,等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 41-48. [MA Wenhong, HE Jiaxiong, YAO Yongjian, et al. Characteristics of Tertiary Sediments and Main Source Rocks, Northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 41-48.]
- [42] 何仕斌,张功成,米立军,等. 南海北部大陆边缘盆地深水区储层类型及沉积演化[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 51-56. [HE Shibin, ZHANG Gongcheng, MI Lijun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 51-56.]
- [43] 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, CHEN Shenhong, 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.]
- [44] 雷超,任建业,裴健翔,等. 琼东南盆地深水区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.]

- [45] 尹新义. 琼东南盆地断裂组合样式及其变形机制模拟分析[D]. 中国地质大学, 2011. [YIN Xinyi. The Faults Combination Style of Qiongdongnan Basin and Simulation Analysis of Their Deformation Mechanism [D]. China University of Geosciences, 2011.]
- [46] 田姗姗. 琼东南盆地裂后期构造沉降分析及古地貌恢复[D]. 中国地质大学, 2010. [TIAN Shanshan. Tectonic Subsidence Analysis and Paleotopography Restoration of Postfifting Strata in the Qiongdongnan Basin [D]. China University of Geosciences, 2010.]
- [47] 蔡佳. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制[D]. 中国地质大学, 2009. [CAI Jia. Paleomorphologic Restoration of Paleogene in Qiongdongnan Basin and Its Control on Sequence Architecture and Sedimentary Characteristics[D]. China University of Geosciences, 2009.]
- [48] 何家雄, 陈胜红, 刘士林, 等. 南海北缘珠江口盆地油气资源前景及有利勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(4): 457-461. [HE Jiaxiong, CHEN Shenhong, LIU Shilin, et al. Potential Petroleum Resources and Favorable Prospecting Directions in Zhujiangkou Basin in Northern Margin of the South China Sea[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(4): 457-461.]
- [49] 崔莎莎, 何家雄, 陈胜红, 等. 珠江口盆地发育演化特征及其油气成藏地质条件[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 384-391. [CUI Shasha, HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, et al. Development Characteristics of Pearl River Mouth Basin and Its Geological Conditions for Oil and Gas Accumulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 384-391.]
- [50] 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 1177-1181. [SHAO Lei, LEI Yongchang, PANG Xiong, et al. Tectonic Evolution and Its Controlling for Sedimentary Environment in Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(9): 1177-1181.]
- [51] 钟建强. 珠江口盆地的构造特征与盆地演化[J]. 海洋湖沼通报, 1994 (1): 1-8. [ZHONG Jianqiang. Characteristics of Geologic Structure and Basin Evolution in Pearl River Mouth Basin [J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 1994 (1): 1-8.]
- [52] 张志杰, 于兴河, 侯国伟, 等. 张性边缘海的成因演化特征及沉积充填模式—以珠江口盆地为例[J]. 现代地质, 2004, 18(3): 284-289. [ZHANG Zhijie, YU Xinghe, HOU Guowei, et al. Genetic evolution and depositional filling model of tensional marginal sea basin: take the Pearl River Mouth Basin as an example [J]. Geoscience, 2004, 18(3): 284-289.]
- [53] А. И. Дьяконов, 赵根榕. 石油形成及油气聚集带分段预测的构造因素[J]. 地质科技情报, 1989 (S1): 63-66. [А. И. Дьяконов, ZHAO Genrong. The structural factors in petroleum formation and hydrocarbon accumulation belt prediction [J]. Geological Science and Technology Information, 1989 (S1): 63-66.]

CENOZOIC GEOLOGICAL PROCESSES AND THEIR BEARING ON HYDROCARBON MIGRATION AND ACCUMULATION IN THE CONTINENTAL MARGINAL BASIN GROUP OF THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

WANG Hongcai^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, SUO Yanhui^{1,2},
DAI Liming^{1,2}, CHENG Shixiu^{1,2}, XU Liqing^{1,2}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Exploration Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: The northern continental marginal basin group of the Southern China Sea, which includes the Yinggehai Basin, the Beibuwan Basin, the Qiongdongnan Basin, the Pearl River Mouth Basin and the Taixi'nan Basin, are located in a very complex geological setting. The formation and evolution of these basins are closely related to the surrounding geological processes. This paper reconstructed the paleo-geographical framework of some key time boundaries since 55 Ma, based on which simply discussion was paid to the migration and accumulation of oil and gas in the area. Following conclusions are reached. (1) The interaction among the Pacific Plate, the Eurasia Plate and the India-Australia Plate affects the formation, migration and accumulation of hydrocarbon in this area. (2) Source rocks are gradually getting younger, as the source rocks and the Mohos are getting deeper from west to east in the Pearl River Mouth Basin, Qiongdongnan Basin and Yinggehai Basin. At the same time, heat flows as well as the potentials of hydrocarbon generation increased. Similar trend of mantle depths are observed in the Beibuwan Basin, the Pearl River Mouth Basin and the Qiongdongnan Basin from north to south. (3) Oil and gas are enriched in the Yinggehai Basin, Qiongdongnan Basin and southern Pearl River Mouth Basin while the geological activities are weak, the subsidence is small and the crust is thin (the Moho depths are less than 24km) so that the geothermal gradients and the heat flows are high in this region. Such conditions can keep the organic matters remained mature or over-mature, which are favorable for the formation of gas source rocks. (4) The hydrocarbon in the Qiongdongnan Basin and the Pearl River Mouth Basin is more prospective than that in the other basins. Especially, the Qiongdongnan Basin and the southern Pearl River Mouth Basin are likely to be the important gas producing area while the northern Pearl River Mouth Basin bears higher oil producing potential.

Key words: the Northern South China Sea; Basin Group; Paleo-geographical Reconstruction; Geological Process; Hydrocarbon Migration and Accumulation