

引用格式:高阳东,向绪洪,张向涛.南海北部新生代沉积演变及其油气地质意义[J].天然气地球科学,2021,32(5):645-656.  
GAO Yangdong, XIANG Xuhong, ZHANG Xiangtao. Cenozoic sedimentary evolution and its geological significance for hydrocarbon exploration in the northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(5): 645-656.  
DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.03.008

# 南海北部新生代沉积演变及其油气地质意义

高阳东,向绪洪,张向涛

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054)

**摘要:**南海北部新生代海陆变迁过程对北部陆缘沉积盆地的沉积充填方式及油气地质特征具有重要的控制作用。基于最新大洋钻探研究成果,结合盆地内已有资料,研究南海北部海相沉积的形成过程,探讨其油气地质意义,可为未来油气资源勘探开发提供依据。受南海洋盆扩张过程的控制,南海北部盆地新生代接受海侵过程总体表现为东早西晚、南早北晚的特点。初始海侵发生在南海东部的台西南盆地始新世,而南海西部的莺歌海盆地则发生在晚渐新世。IODP367/368航次揭示,南海盆地初始海侵期发生在约34 Ma,为南海洋盆初始打开时期;大规模海侵引起的沉积环境剧变期对应于南海西南次海盆打开的时期(约23 Ma),是南海扩张的鼎盛时期。海陆变迁过程控制了海陆过渡相、海相烃源岩及储层在盆地中的分布,南海北部各盆地海相烃源岩层系具有由东向西逐步变年轻的规律,与区域内由东向西逐步接受海侵的方向相一致。区域海平面变化受到南海海盆扩张过程及全球海平面变化的综合影响,使南海碳酸盐岩台地的发育时间也存在东早西晚、南早北晚的特点,构成南海北部自生自储式的油气藏类型。海陆变迁控制了不同盆地的沉积充填方式,奠定了海相沉积的油气资源物质基础。南海北部生储盖组合在横向上受控于物源供给及海陆变迁造成的沉积环境演变,纵向上主要受控于南海构造演化及区域海平面升降。

**关键词:**南海;海陆变迁;海相地层;海平面变化;油气资源

**中图分类号:**TE121.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2021)05-0645-12

## 0 引言

中国海域新生代沉积盆地富含油气资源,其中珠江口盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地以及琼东南盆地都位于南海北部海域(图1)。近半个多世纪的油气勘探已在南海北部陆架浅水区发现多个大中型油气田<sup>[1]</sup>,相较而言,虽然广阔的陆坡深水区勘探与研究程度相对较低,但油气资源潜力巨大,可以作为未来油气勘探开发的重点和方向<sup>[2-3]</sup>。目前南海北部区域已发现的油气资源中,虽然主力烃源岩类型有陆相与海相之分,但主要储层均为海陆过渡相、滨浅海相砂岩、礁灰岩等储集体,无论油气成藏模式是“陆生海储”还是“海生海储”,都与海相及海陆过渡相沉积的形成紧密相关,使得我们不得不更加关注海陆变迁作用对于南海北部新生代油气资

源的控制。

海侵与海退过程对沉积相的发育及油气的生成聚集具有明显的控制作用。新生代南海北部海平面整体呈上升趋势,虽然在大趋势上与全球海平面变化并不完全一致,但就阶段性与旋回性而言,两者存在着很好的对应关系。南海北部新生代主要经历了陆相—海陆过渡相—海相的沉积演变过程<sup>[3-4]</sup>。由于各盆地的构造位置及自身性质的不同,盆地之间海侵时间与海侵规模并不一致<sup>[5]</sup>。不同盆地的沉积充填特征受构造运动与区域海平面变化的联合控制,从而奠定了盆地内不同的油气资源基础。

南海北部海陆变迁过程除了受到全球海平面变化的影响外,很大程度上与新生代南海海盆张裂过程息息相关。南海大洋钻探发现了南海张裂过

收稿日期:2021-01-18;修回日期:2021-03-12.

作者简介:高阳东(1975-),男,山东黄县人,高级工程师,主要从事海洋油气勘探与开发研究.E-mail:gaoyd@cnooc.com.cn.

通信作者:向绪洪(1986-),男,湖南张家界人,工程师,硕士,主要从事沉积学研究.E-mail:xiangxh@cnooc.com.cn.

程及海陆环境变迁的新资料,为重新审视南海北部海陆变迁与油气成藏之间的耦合关系提供了有力证据。本文研究基于最新大洋钻探研究成果,结合南海张裂过程,研究南海北部海相沉积的形成过程,对其油气地质意义进行分析与探讨,以期对未来油气资源勘探开发提供依据。

## 1 地质背景

南海北部陆缘特殊的构造位置与构造性质,造就其构造演化的区域差异性与分期性,形成了特殊的沉积充填特征<sup>[6-7]</sup>。古近纪以来南海发生板缘裂解,经历陆相断陷和海相坳陷的构造演化过程,伴

随着沉积环境自陆相向海相的转变,形成了现今边缘海被动大陆边缘不同类型盆地的基本格局<sup>[8]</sup>。南海北部大陆边缘盆地普遍具有断坳双层结构,按构造体系不同可分为2个区<sup>[4]</sup>:西区为莺歌海盆地,为走滑拉分型盆地,盆地长轴走向为北西向;东区为陆内裂谷盆地北部湾盆地,以及陆缘裂谷盆地琼东南盆地和珠江口盆地,盆地构造线为北东—北东东走向(图1)。盆地内新生代沉积均具有早期陆相、晚期海相的环境转变,沉积体系迭代形成了多套不同储盖组合类型,晚期新构造运动和烃源供给系统及含油气圈闭时空上耦合配置,最终影响了盆地含油气系统特征及其油气运聚成藏<sup>[9]</sup>。

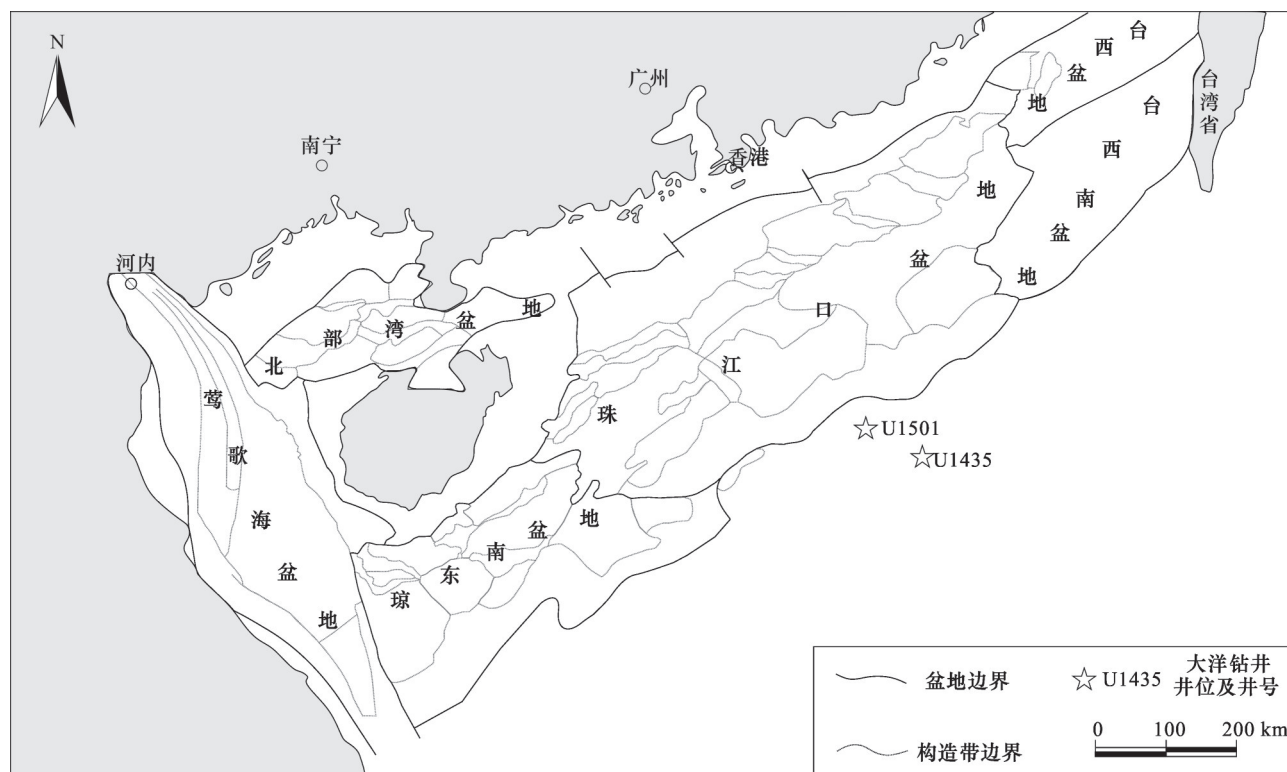


图1 南海北部新生代含油气盆地分布示意

Fig.1 Cenozoic hydrocarbon-bearing basin distribution in northern South China Sea

## 2 新生代南海板缘张裂与南海北部海陆变迁过程

### 2.1 南海板缘张裂过程简述

长期以来,南海的形成机制及动力学来源都是研究的热点问题,主要观点包括源于印支半岛挤出的“逃逸说”机制<sup>[10]</sup>,以及古南海板块向婆罗洲俯冲导致南海拉开的“俯冲说”机制<sup>[11]</sup>等。国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IO-DP)367/368航次认为,南海张裂并非传统认为的

大西洋模式中的非火山型被动陆缘,而是由太平洋板块对欧亚板块的斜向俯冲使得南海沿板块边界走滑断层张裂而成<sup>[12]</sup>,沿华南板块边缘发生破裂<sup>[13]</sup>,海盆裂陷作用的主要驱动力来自东部板块的相互作用<sup>[14]</sup>。基于洋壳玄武岩定年揭示东部次海盆初始打开时间为34 Ma,西南次海盆的初始张裂时间为23 Ma<sup>[15]</sup>,与海底磁异常条带所确定的南海海底扩张始于晚渐新世早期(约32 Ma),并在晚渐新世发生了洋脊的跃迁与西南次海盆打开的认识基本一致<sup>[16]</sup>,洋壳年龄的结果证实了新生代期间南海经历

了多期扩张沉降,形成现今南海构造沉积格局。

新生代早期,南海经历了从活动大陆边缘向被动大陆边缘的转变<sup>[8,17]</sup>。在发生构造体系转换之前,南海位于汇聚板块边缘,受侏罗纪及早白垩世古太平洋板块向欧亚板块北西向俯冲的影响,在晚白垩世晚期区域地球动力学环境依旧为挤压环境<sup>[13]</sup>,在约60~50 Ma前后,经历扩张脊俯冲造成南海北部大规模火成岩活动及地表抬升。新生代早期,诸如南沙—巴拉望微陆块仍拼贴在欧亚大陆的东南缘,南海北部大部分地区处于隆升剥蚀环境<sup>[17]</sup>。始新世,由于太平洋板块相对欧亚板块的运动速度和运动方向发生偏转,导致区域地球动力学环境由挤压转变为伸展,是南海板缘张裂发生的动力来源,诱发了南海在华南板块南缘的陆缘张裂,根据火山弧活动停止时间(~50 Ma)及婆罗洲北缘增生楔年龄(约45 Ma),推断古南海俯冲已开始并对南海北部陆源张裂产生拖拽驱动<sup>[18]</sup>。婆罗洲保留了古新统一始新统被动陆源海相沉积,为古南海环境下的沉积产物,婆罗洲地块地层由北向南逐步变新。地层沉积记录表明,古南海自早白垩世末初始裂解,至渐新世后古南海板块向南俯冲,直至消失在婆罗洲之下<sup>[3]</sup>。到中中新世,由于受到澳大利亚板块向北漂移的阻挡,南海的张裂过程停滞,区域地球动力学环境再次转变为挤压环境,大致形成现今基本构造格局(图2)。

## 2.2 南海北部新生代海陆变迁与沉积环境演化

南海北部新生代海陆变迁总体呈现先陆相后海相、先湖盆后海盆的演化规律<sup>[19]</sup>。但由于各沉积盆地处于南海海盆位置不同,海陆变迁与沉积环境转变时间存在明显差异,海侵发生时间整体呈现东早西晚,南早北晚的特点。

台西南盆地DP21-1钻孔揭示,早始新世晚期为浅海陆棚环境,其西侧的大洋钻探U1501孔发现<sup>[20]</sup>,上始新统以下地层中无海相微体化石,上始新统中出现以*Planulariasp.*、*Gaudryinasp.*、*Quinqueloculinasp.*为代表的浅海底栖有孔虫,种属特征与台湾始新统同裂谷沉积中的相似<sup>[20-21]</sup>,沉积环境总体表现为浅海陆架环境,显示海相环境由东向西的拓展过程。大洋钻探U1435A孔同样揭示上始新统为厚达280 m的滨海—三角洲相沉积<sup>[22]</sup>,显示南海北部东侧深水区在晚始新世已经发生海相沉积。

南海海陆环境转变与南海海盆形成过程息息相关<sup>[5]</sup>,源汇对比研究揭示,南海北部沉积物在始新

世/渐新世(约33 Ma)以及渐新世/中新世(约23 Ma)发生物源供给及沉积环境的显著变化<sup>[17,23]</sup>,与南海初始扩张以及西南次海盆打开事件相对应。

南海新生代海陆变迁与沉积古地理演化过程分为3个阶段:第1阶段(古新世):南海大部分地区为隆升剥蚀区,仅在北部湾盆地和珠三坳陷发育零星陆相山间盆地,以火山碎屑岩堆积为主;第2阶段(始新世):陆相断陷盆地发育,该阶段是南海构造样式形成的开始,也是沉积演化最明显的阶段。南海东部南侧发生明显的海侵过程,逐渐从陆地环境变为海洋环境。中始新世台西南盆地接受了海相沉积。晚始新世,南海洋盆开始打开,海侵从东部逐步向西拓展,海洋环境分布相对有限,仅在珠江口盆地南侧深水区发育,陆源碎屑除源自盆地周边的隆起区外,主要通过东西向的“昆莺琼古河”从西向东搬运[图3(a)];渐新世,海侵规模进一步拓展,在早渐新世晚期到琼东南盆地与莺歌海盆地,海侵的作用将“昆莺琼古河”淹没,但仍能通过海底水道将陆源碎屑搬运至白云凹陷深水区,珠一坳陷发生海侵[图3(b)];早中新世,北部湾盆地也逐渐转化为海相环境[图3(c)],珠江口盆地陆架边缘三角洲—深水扇体系,中沙—西沙地区开始发育碳酸盐岩台地<sup>[24]</sup>;中中新世,海侵范围进一步扩大,陆源输入格局基本继承早中新世特点,碳酸盐岩台地大范围发育[图3(d)]。该阶段是南海沉积环境快速转变时期,海水从东向西、由南向北逐步推进,造成破裂不整合面从东向西逐步抬升的穿时现象;第3阶段(晚中新世以来):南海海盆扩张停滞和萎缩。南海洋盆在菲律宾海板块的挤压下发生一定程度的萎缩,部分洋壳向东消亡在菲律宾海板块之下<sup>[25]</sup>。此阶段,南海沉积环境基本稳定,无明显海陆环境迭代变化。由于海平面快速上升,大量碳酸盐岩台地淹没消失<sup>[26]</sup>。

## 3 海相地层分布及油气地质意义

南海北部海相沉积主要包含海相碎屑岩沉积与碳酸盐岩生物礁沉积。由于各盆地海侵时间不同,造成不同类型烃源岩及储集体在南海北部区域的差异。此外,碳酸盐岩台地发育与分布同样受海陆变迁及区域海平面的控制,体现出区域性特征。

### 3.1 海相碎屑岩分布及其油气地质意义

受构造运动与海平面升降的影响,南海北部陆缘盆地主力烃源岩有所不同[图4(a)]。湖相烃源



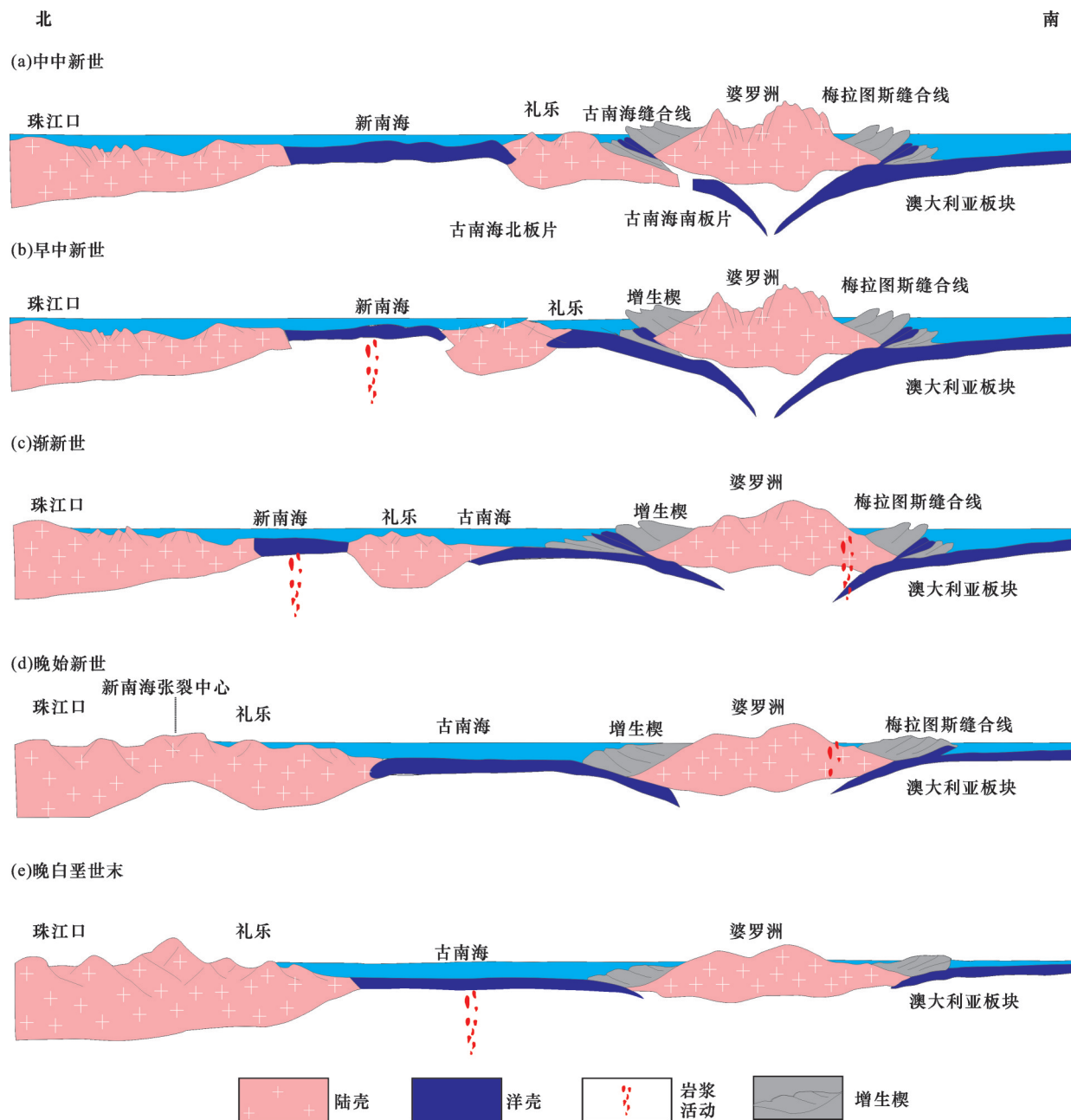


图2 南海构造演化模式(据文献[3]修改)

Fig. 2 Tectonic evolution model of South China Sea(modified by Ref. [3])

岩主要分布在北部湾盆地及珠江口盆地始新统;海陆过渡相烃源岩主要分布在琼东南盆地及珠江口盆地深水区渐新统;而海相烃源岩主要分布在莺歌海盆地及双峰盆地珠江口盆地深水区中新统。从盆地主力烃源岩组合特征来看,珠江口盆地与琼东南盆地均是以湖相烃源岩为主力烃源岩,海陆过渡相及海相烃源岩次之;莺歌海盆地以海相烃源岩为盆地主力烃源岩,陆相烃源岩及海陆过渡相烃源岩相对较少;北部湾盆地以湖相烃源岩为盆地主力烃源岩,海陆过渡相及海相烃源岩不发育<sup>[3,27-28]</sup>。

南海北部碎屑岩储层既有巨厚的陆相冲积扇、河流或湖泊三角洲相粗碎屑沉积,也发育有浅海三角洲和深海海底扇相砂岩<sup>[1,29-31]</sup>,其中珠江口陆架边缘三角洲—陆坡深水扇沉积体系,是南海北部最为主要的油气蕴藏沉积体,具有厚度大、分布广、成藏好的特点,是目前油气勘探开发的热点<sup>[32]</sup>。不同类型储层具有不同的发育时代及沉积体系特征。南海北部主力储层发育于渐新世,珠江口盆地珠海组浅海相三角洲砂岩储层、琼东南盆地陵水组扇三角洲相砂岩储层都是这一时代储层的代表,为陆架区

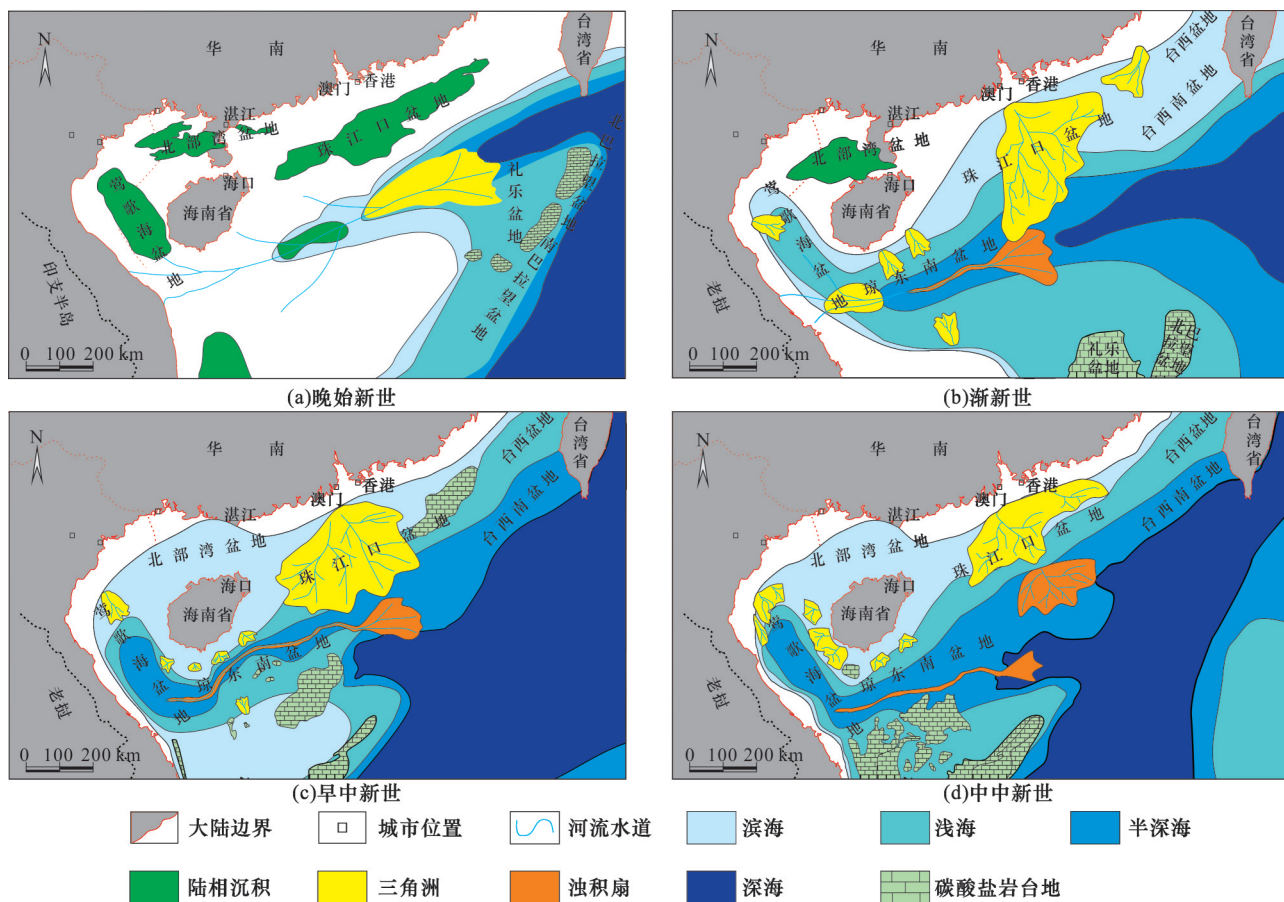


图3 南海北部新生代沉积环境演变

Fig.3 Sedimentary facies distribution of northern South China Sea since Cenozoic

牵引流沉积体系及浅水三角洲相储层,是盆地内主要油气生产层位,南海北部已探明油气田及油气构造基本上均与此类储层有关<sup>[33-35]</sup>。在渐新世晚期和中新世早期,大量的物源供给为发育大规模陆架边缘三角洲和富砂的斜坡浊积扇沉积提供了物质条件<sup>[29,32]</sup>。在此背景下形成的下中新统储层主要发育在珠江口陆坡深水区及琼东南盆地北部隆起带和中央裂陷带,为陆坡深水区重力流成因储层,以珠江口盆地南部白云凹陷深水区荔湾3-1等深水气田群不同类型深水扇储层<sup>[35]</sup>和琼东南盆地西南部乐东—陵水凹陷陵水17-2等深水气田群中央峡谷水道砂储层为代表。此外晚中新世昆莺琼古河流在琼东南盆地残余的中央峡谷构成的南海西侧深水区重要储集层<sup>[30,33]</sup>,都将是未来南海北部深水区油气勘探开发的重要方向及目标<sup>[34]</sup>。

### 3.2 碳酸盐岩油气地质意义

生物礁油气藏在世界油气储量中占有重要地位<sup>[36]</sup>。南海海域碳酸盐岩及生物礁主要发育在稳定地块或古隆起上,其形成通常需要具备以下条

件:该时期构造相对稳定、海平面相对稳定并缓慢上升、陆源碎屑供给匮乏或缺少。南海北部碳酸盐岩和生物礁分布具有区域性特征,主要分布在珠江口盆地东沙隆起、神狐隆起,琼东南盆地的松涛隆起、崖北凸起,以及西沙—中沙海域[图4(b)]<sup>[26]</sup>。珠江口盆地地下中新统广泛发育各类生物礁滩灰岩[图4(b)],其中东沙隆起、琼海凸起和神狐隆起碳酸盐岩台地或生物礁滩规模大,储集物性良好,为重要油气储集层<sup>[34]</sup>;琼东南盆地中新统三亚组发育滨浅海相碳酸盐岩台地、南部隆起区梅山组发育礁滩相[图4(b)];莺歌海盆地由于盆地窄,断陷较深,并有红河三角洲沉积充填作用影响,不利于生物礁的形成和发育。

南海北部主要生物礁油气藏是在断块高地上生长的礁隆构造,珠江口盆地已开发了流花11-1、流花4-1和陆丰15-1等生物礁油气田,流花11-1油田为渐新世—中新世发育的大型生物礁油藏,油藏厚度及储量都十分可观,生物礁灰岩为其主要储层<sup>[29]</sup>。相较于南海南部的礼乐盆地、曾母盆地等,

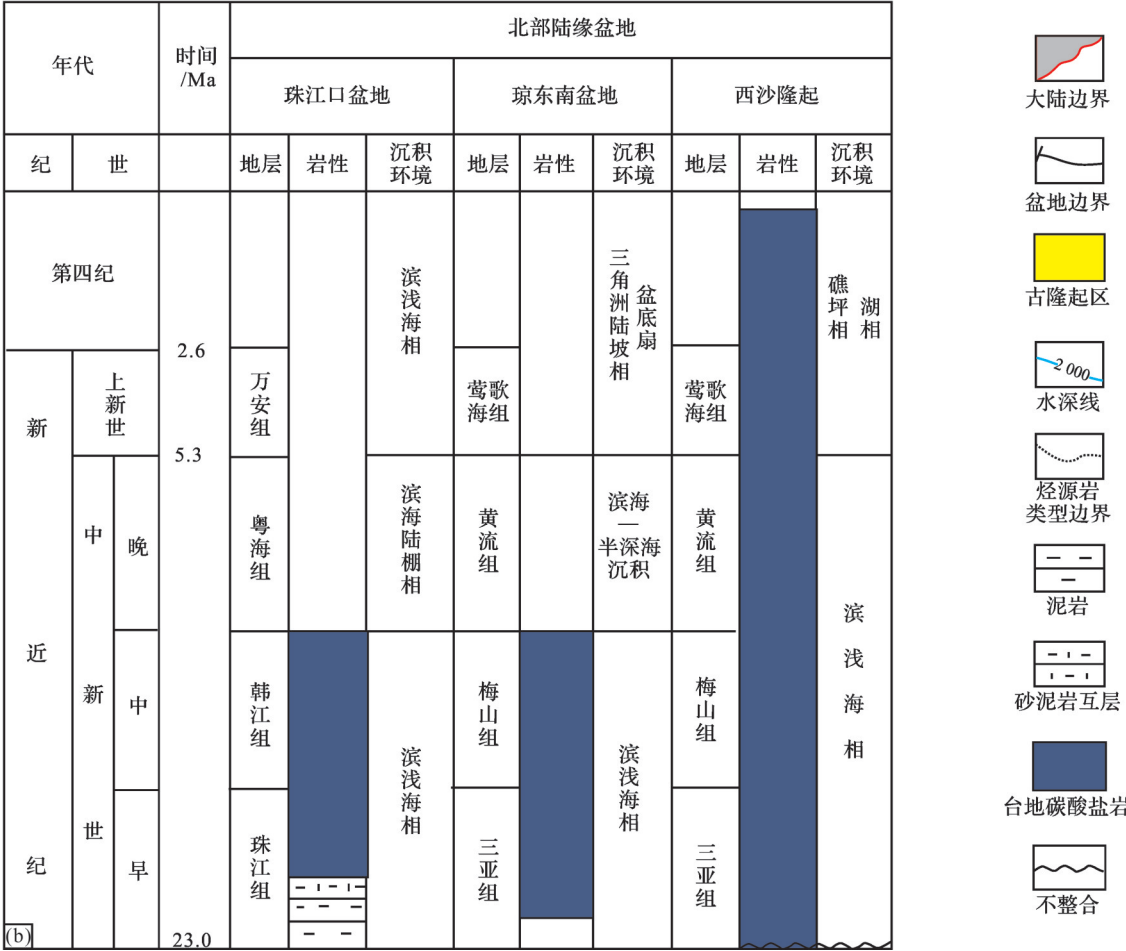
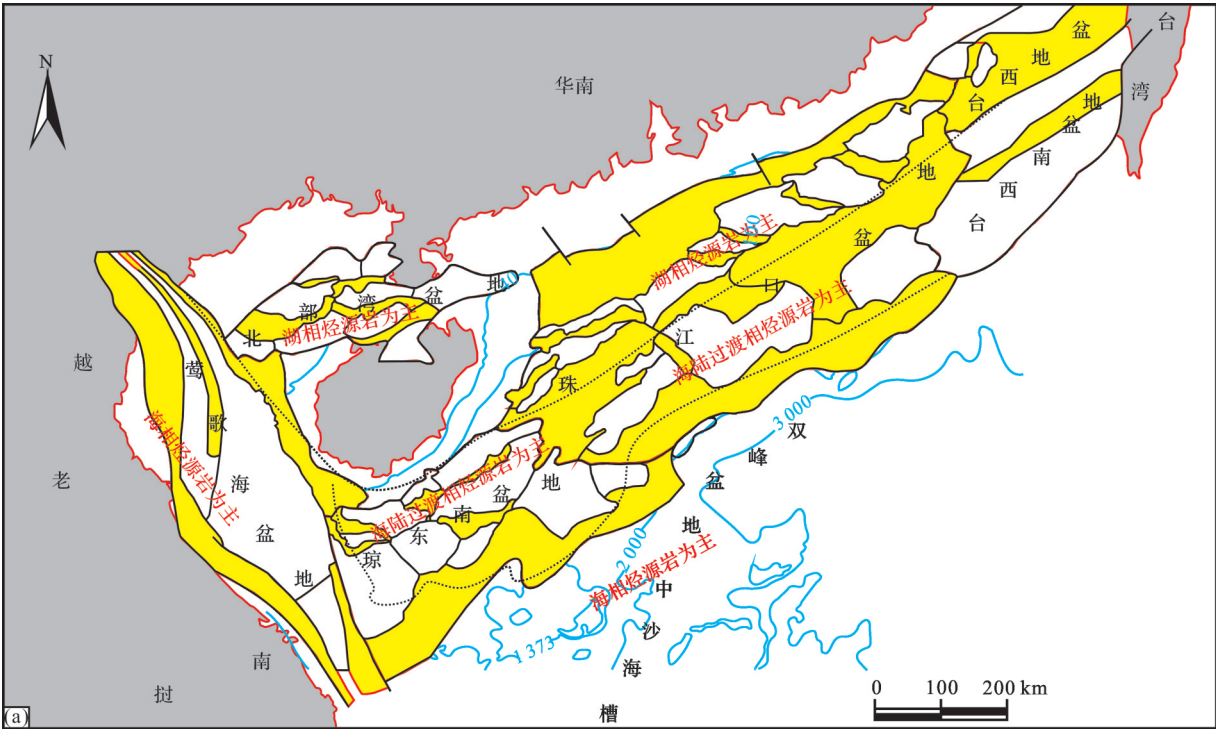


图4 南海北部主力烃源岩分布示意<sup>[38]</sup>(a)和南海北部台地碳酸盐岩分布(b) (b图据文献[26]修改)

Fig.4 Main hydrocarbon source rocks distribution<sup>[38]</sup> (a)and carbonate platform distribution (b) in northern South China Sea (b map is modified by Ref.[26])



无论从发育时间及规模上看,南海北部碳酸盐岩均要逊色于南海南部,相对研究及开发程度也要低得多,其油气潜力有待进一步开发。近些年针对碳酸盐岩油气资源的研究,给南海北部碳酸盐岩油气勘探开发提供了新的可能。渐新世抱球虫生物碎屑灰岩高孔渗优质储层的发现,为南海北部深水区碳酸盐岩油气资源勘探提供了新的思路<sup>[37-38]</sup>,深水区碳酸盐岩油气资源将是未来油气勘探开发的新领域。除单纯的生物礁油气藏外,碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积也被勘探开发所证实具有巨大的岩性油气藏勘探潜力,珠江口盆地东部勘探实践证实目前已发现油气藏中绝大多数都分布在混合沉积区。混合区碎屑岩储层与泥岩、混积岩、碳酸盐岩盖层形成良好储盖结构,低含砂率沉积有利于形成侧向和垂向封堵,惠州凹陷南部、陆丰凹陷南部及白云凹陷东部是混合沉积岩性油气藏有利分布区,未来同样勘探开发潜力巨大。

## 4 区域海平面变化对油气资源的影响

### 4.1 区域海平面变化对生储盖组合特征的控制

前人<sup>[39-40]</sup>通过古生物资料对南海北部各盆地的区域海平面变化分别进行了研究,并在此基础上对南海北部整体海平面变化规律进行了总结<sup>[20]</sup>。与全球海平面变化旋回对比研究表明,虽然演化趋势及变化特征上存在差异,但阶段性与旋回性明显受到全球海平面变化的制约<sup>[25]</sup>。不同盆地的区域海平面变化存在着一定的差异,反映出盆地构造作用和沉积物供给对区域海平面变化的叠加效应。

南海北部大规模海平面变化可以划分为4个期次(图5)。第Ⅰ期发生在晚始新世之前( $\sim 38$  Ma),南海北部海侵普遍还未开始,沉积环境以陆相为主;第Ⅱ期发生在晚始新世—渐新世( $38\sim 23$  Ma),南海北部沉积盆地由东向西陆续开始接受海侵,在晚渐新世中期达到该期次的最大海水深度,随后发生海退,水体深度逐渐减小;第Ⅲ期海平面变化时期为早—中中新世( $23\sim 10.5$  Ma),在渐新世晚期明显海退后,在早中新世开始新一轮海侵,并逐步在中中新世初期海侵范围达到最大,水体最深,之后到中中新世末海退逐步发生;第Ⅳ期大规模海平面变化时间为晚中新世—上新世( $10.5\sim 2.6$  Ma),本次海侵将整个南海北部淹没,此时南海北部绝大部分地区成为浅海环境,在上新世中期发育本旋回内最大海泛事件,整个陆架达到最大水深,晚期海水

逐渐后退。第四纪期间海平面变化总体趋势平稳,三级旋回发育,主要与冰期/间冰期全球气候旋回事件有关。

海平面变化控制了南海北部沉积盆地的充填模式,从而进一步控制了烃源岩、储集体及盖层系统的分布与发育<sup>[20]</sup>。烃源岩主要发育于强裂陷期内,在发育时间上具有由东向西逐渐变新的趋势,有机质丰度及烃源岩成熟度同样表现出类似特征(图5),与各盆地的沉积充填过程相关。解习农等<sup>[33]</sup>认为,珠江口盆地及琼东南盆地断陷前期陆相沉积及断陷期海陆过渡相沉积均已达到生烃门限深度,因此陆相沉积与海陆过渡相沉积都可作为烃源岩参与生烃;由于接受巨厚的裂后沉积,使得莺歌海盆地除了上述沉积外,其早期接受的海相沉积也能够参与生烃,且由于海相沉积的速率快、规模大,莺歌海盆地海相烃源岩规模与成熟度都远优于南海北部其他沉积盆地海相烃源岩;珠江口盆地深水区由于高地热梯度的影响,中新世海相烃源岩也达到生烃门限<sup>[41]</sup>;北部湾盆地由于较晚转为海相环境,裂后期沉积积累有限,仅早期陆相沉积能够达到生烃门限,烃源岩发育以陆相烃源岩为主,海陆过渡相及海相烃源岩相对不发育。

南海北部以晚中新世以来沉积地层为区域盖层,在不同盆地内具有较好的统一性,此时沉积环境稳定,海陆分布范围比较固定;各盆地内发育的局部盖层差异,主要由海陆转换过程及区域海平面变化导致,海侵事件下最大海泛面时期形成的凝缩层泥岩,能够起到很好的封闭作用,此外海进体系下发育的泥岩为下伏砂岩储层起到一定的封堵作用。

总体而言,海陆变迁引起的地层纵向迭代,是南海北部油气生储盖系统发育的基础,主要受控于区域海平面变化与盆地构造演化,而横向分布差异主要受区内海陆变迁及物源供给控制。

### 4.2 珠江口盆地海平面变化与沉积体系响应特征

珠江口盆地是目前南海北部油气资源勘探开发程度最高的盆地,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。已有勘探成果表明,珠江口盆地油气分布具有“北油南气”的特征,即北部陆架区为石油富集区,南部深水区为天然气富集区<sup>[29]</sup>。受海平面变化影响,珠江陆架区三角洲沉积体系的进积与

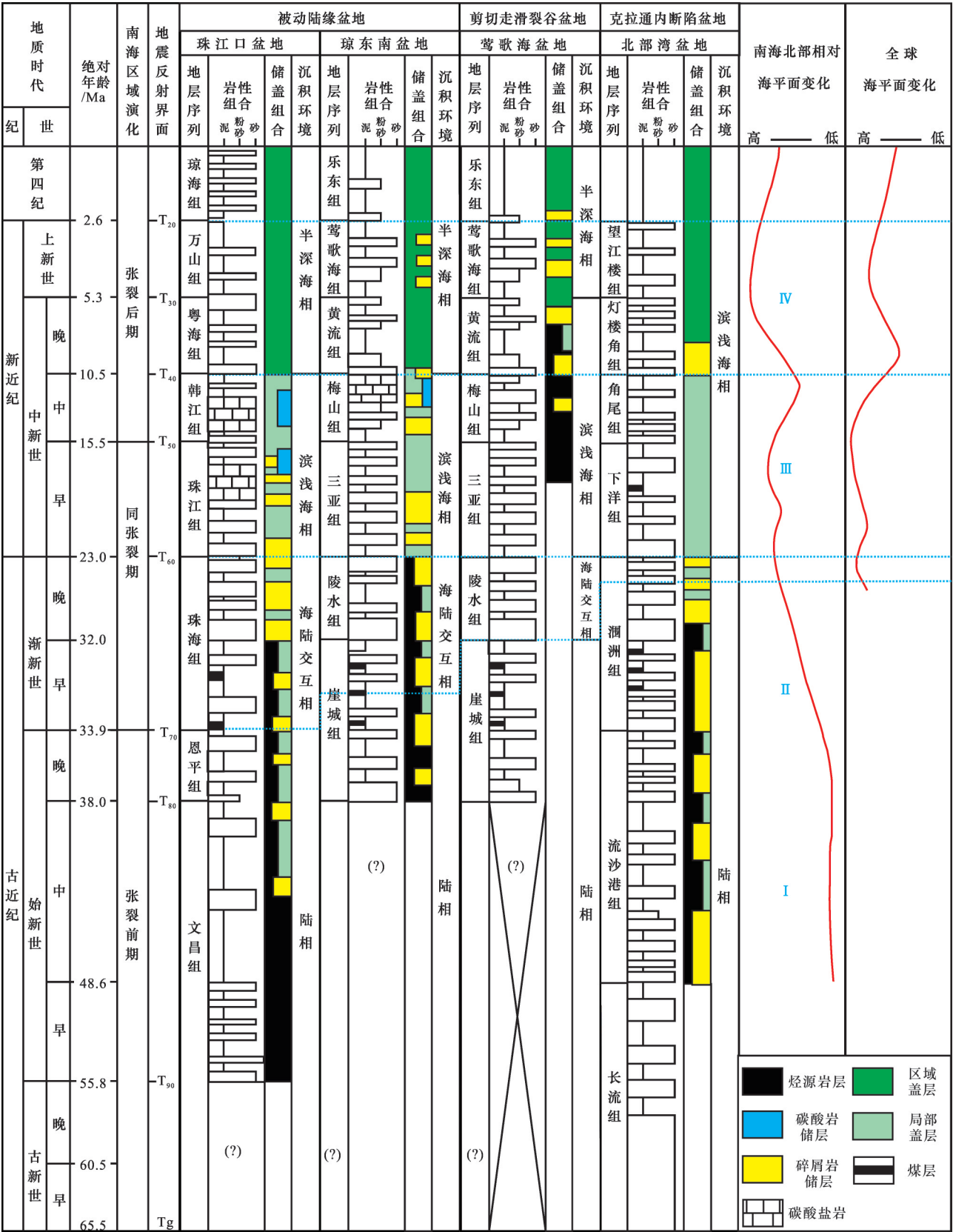


图5 南海北部新生代沉积盆地地区海平面变化与生储盖组合特征

Fig.5 Sea level changes and features of source-reservoir-seal assemblages in Cenozoic sedimentary basins of northern South China Sea



退积,以及陆坡区深水扇沉积体系的发育呈规律相变化。在稳定构造环境下,珠江大河物源持续输入,使珠江口盆地三角洲—深水扇沉积体系与区域海平面变化及海岸上超事件呈现良好的耦合关系。盆地深水区以大型高位三角洲前缘为背景的深水陆坡区是最有利于发育砂质深水扇的区域<sup>[42]</sup>。陆架坡折带的跃迁及海平面变化形成三角洲与深水扇沉积纵向上的叠置,组成了三角洲体系与深水扇之间特殊的“源—汇”对应关系。

在33.9 Ma之前,南海北部盆地总体上沉积环境以陆相为主,发育多个断陷盆地,以多沉积中心为特征,为局部隆起物源条件下的近源沉积为主,在拗陷西侧发育有昆莺琼古河流三角洲<sup>[17]</sup>;珠海组沉积时期(33.9~23 Ma),白云、荔湾地区发育多期砂体前积结构,具有大河物源形成的三角洲堆积,盆地南部发育海陆过渡—滨浅海相沉积,是珠江口盆地初始海侵的时间;珠江组沉积期(23~15.5 Ma),海平面急速上升,陆架坡折带从白云凹陷南侧快速迁移到凹陷北侧,形成区域内最大海泛面,在陆架区形成凝缩层,地震反射特征明显,东沙隆起区被淹没,盆地总体进入海相环境;韩江组沉积期(15.5~10.5 Ma),海平面变化较为频繁,三角洲与深水扇体系发育此起彼伏,分别以陆架与深水陆坡环境为主要沉积场所,地震剖面上S型前积特征明显,在白云凹陷内,韩江组沉积物为多期的深水扇叠置,陆架区也伴随多期的珠江三角洲沉积体系的进退。

研究发现,盆地新生代沉积具有先陆相后海相、从南向北逐步推进的发展过程。始新世海侵仅在凹陷南侧洋壳破裂区,凹陷主体发育陆相沉积,西侧发育大型三角洲沉积。在晚始新世末,受南海张裂的影响,珠江口盆地南部荔湾凹陷开始接受海侵,发育滨浅海相沉积,此为珠江口盆地初始海侵时间;渐新世开始,海侵作用有所加强,凹陷西侧昆莺琼古河流进入繁盛期,加之古珠江物源供给,在凹陷内发育大规模的浅水陆架三角洲体系;白云运动之后,珠江口盆地快速转化为海相环境,陆架坡折带快速北移,白云凹陷进入深水沉积环境。此阶段区域海平面快速上升,东沙隆起等古高地被淹没,形成大范围的浅海相环境,此后基本保持现有沉积格局。

碳酸盐岩台地由于生长发育条件苛刻,灵敏地反映了海平面变化的阶段性与旋回性。南海北部

陆架生物礁发育时间南早北晚,是海侵由南向北推进的结果。WU等<sup>[25]</sup>和鲁毅等<sup>[43]</sup>通过对西沙碳酸盐岩台地XK-1井的综合分析与研究,重建了中新世以来碳酸盐岩台地发育与海平面变化关系。西沙礁平台的演化呈现明显的阶段性特征:中新世早期,海水深度的增加促进了珊瑚礁的生长,形成潟湖—环礁;中中新世晚期,海平面显著下降,礁体结构暴露于大气条件下,受到严重侵蚀;晚中新世海平面上升导致西沙生物礁台地的重新形成,并在整个上新世形成潟湖相;更新世期间,海平面振荡频率高,振幅大,礁体结构经常暴露于强烈的淋滤和侵蚀作用中。这个过程一直持续到全新世早期海平面上升。西沙地区碳酸盐岩台地发育受区域海平面变化影响,说明南海北部海平面变化既受全球海平面变化的影响,也受南海区域构造沉降的控制<sup>[43-44]</sup>。

## 5 结论与认识

南海北部陆缘新生代沉积盆地蕴含丰富的油气资源,盆地构造演化、海陆变迁及区域海平面变化对油气的分布起到重要控制作用:

(1)南海海陆变迁过程与南海海盆扩张息息相关,南海北部的初始海侵发生在始新世,海侵作用具有东早西晚、南早北晚的特征,与南海海盆初始张裂以及由东向西逐步张裂的扩张模式具有良好对应关系。荔湾凹陷在晚始新世出现初始海侵,白云凹陷则在早渐新世发生海侵,琼东南盆地则在早渐新世晚期发生初始海侵。在西南次海盆打开,南海加速扩张时期(23 Ma),南海北部整体进入海相环境,是海陆变迁及沉积环境发生重大变化的时期。

(2)南海北部新生代区域海平面总体呈上升趋势,分为4个阶段,不同盆地具有一定的差异,但旋回性及阶段性特征基本相同,区域海平面变化受全球海平面变化与南海构造叠加作用的控制。

(3)南海北部海陆变迁及区域海平面变化,控制了盆地的沉积充填模式,从而决定了生储盖油气系统的发育。海相及海陆过渡相烃源岩及储集体主要发育在浅水陆架及深水陆坡区,碳酸盐岩油气系统主要发育在局部隆起区;陆架坡折带区域发生的三角洲—深水扇叠置、碳酸盐岩演化过程对区域海平面变化具有良好的对应关系。

(4)南海北部海相油气资源前景广阔,烃源岩分布与海陆变迁过程息息相关;储盖组合受海平面

变化及盆地构造运动控制,总体表现为横向上受控于物源供给及沉积环境演变、纵向上受控于海平面变化。陆架边缘三角洲—深水扇沉积体系、昆莺琼大型水下古河道以及早期滨海相砂岩应是未来海相油气勘探重点关注领域,碳酸盐岩油气资源也是未来油气勘探的方向之一。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱伟林.南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M].北京:石油工业出版社,2007.  
ZHU W L. Gas Geology in Marginal Basins of the Northern South China Sea[M].Beijing:Petroleum Industry Press, 2007.
- [2] 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 G C, MI L J, WU S G, 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.
- [3] 张功成,王璞珺,吴景富,等.边缘海构造旋回:南海演化的新模式[J].地学前缘,2015,22(3):27-37.  
ZHANG G C, WANG P J, WU J F, et al. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: A new evolution model of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 27-37.
- [4] 朱伟林,张功成,高乐.南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J].石油学报,2008,29(1):1-9.  
ZHU W L, ZHANG G C, GAO L. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [5] ZHANG H, SHAO L, ZHANG G C, et al. The response of Cenozoic sedimentary evolution coupled with the formation of the South China Sea[J]. Geological Journal, 2020, 55(10): 6989-7010.
- [6] SHAO L, CUI Y C, STATTEGGER K, et al. Drainage control of Eocene to Miocene sedimentary records in the southeastern margin of Eurasian Plate[J]. Geological Society of America Bulletin, 2019, 131(3-4): 461-478.
- [7] HURCHISON C. Marginal basin evolution: The southern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [8] 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 S Z, SUO H Y, LIU X, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.
- [9] SHAO L, CAO L C, PANG X, et al. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(2): 255-269.
- [10] TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R. On the mechanism of collision between India and Asia [C]//COWARD M, RIES A C (eds.). Collision Tectonics. Geological Society of London Special Publications, 1986, 19: 111-157.
- [11] HALL R, BREITFELD T. Nature and demise of the Proto-South China Sea[J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 2017, 63: 61-76.
- [12] HUANG C Y, WANG P X, YU M M, et al. Potential role of strike-slip faults in opening up the South China Sea[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 891-901.
- [13] ZHU W L, CUI Y C, SHAO L, et al. Reinterpretation of the South China Sea Pre-Cenozoic basement and geodynamic implications of the SE Asia: Constraints from combined geological and geophysical records [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, ID: AOS-2019-11-0286.R1.
- [14] WANG P X, HUANG C Y, LIN J, et al. The South China Sea is not a mini-Atlantic: Plate-edge rifting vs intraplate rifting[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 902-913.
- [15] LARSEN H C, MOHN G, NIRRENGARTEN M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea[J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 782-789.
- [16] LI C F, LI J B, DING W W. Seismic stratigraphy of the central South China Sea Basin and implications for Neotectonics [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(3): 1377-1399.
- [17] 邵磊,崔宇驰,乔培军,等.南海北部古河流演变对欧亚大陆东南缘早新生代古地理再造的启示[J].古地质量, 2019, 21(2): 216-231.  
SHAO L, CUI Y C, QIAO P J, et al. Implications on the Early Cenozoic palaeogeographical reconstruction of SE Eurasian margin based on northern South China Sea palaeo-drainage system evolution[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(2): 216-231.
- [18] 孙珍,林间,汪品先,等.国际大洋发现计划 IODP367/368/368X 航次推动南海国际化海洋科考成果[J].热带海洋学报, 2020, 39(6): 18-29.  
SUN Z, LIN J, WANG P X, et al. International collaboration of ocean exploration in the South China Sea enhanced by International Ocean Discovery Program Expeditions 367/368/368x [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(6): 18-29.
- [19] 于兴河,李胜利,乔亚蓉,等.南海北部新生代海陆变迁与不同盆地的沉积充填响应[J].古地质量, 2016, 18(3): 349-366.  
YU X H, LI S L, QIAO Y R, et al. The Cenozoic changes of seas and lands and sedimentary filling responses of different basins in northern South China Sea[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 349-366.
- [20] JIAN Z M, JIN H Y, KAMINSKI M A, et al. Discovery of the marine Eocene in the northern South China Sea[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 881-885.
- [21] HUANG C Y, SHAO L, WANG M H, et al. Benthic foraminiferal fauna and sediment provenance of Eocene syn-rift sequences in Taiwan: Implication for onset of Asian epi-ontinen-

- tal marginal seas off China coast[J]. *Marine Geophysical Research*, 2018, 40(2):1-17.
- [22] SHAO L, MENG A H, LI Q Y, et al. Detrital zircon ages and elemental characteristics of the Eocene sequence in IODP Hole U1435A: Implications for rifting and environmental changes before the opening of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 39-51.
- [23] 邵磊, 庞雄, 张功成, 等. 南海北部渐新世末的构造事件[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2009, 34(5): 717-724.
- SHAO L, PANG X, ZHANG G C, et al. Late Oligocene tectonic event in the northern South China Sea and its implications [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(5):717-724.
- [24] SHAO L, CUI Y C, QIAO P J, et al. Sea-level changes and carbonate platform evolution of the Xisha Islands (South China Sea) since the Early Miocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485:504-516.
- [25] WU J, SUPPE J, LU R, et al. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(6):4670-4741.
- [26] 吴时国, 朱伟林, 马永生. 南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 1-17.
- WU S G, ZHU W L, MA Y S. Vicissitude of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea: Sedimentation in semi-closed marginal seas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6):1-17.
- [27] 梁建设, 张功成, 王璞珺, 等. 南海陆缘盆地构造演化与烃源岩特征[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(5):1309-1319.
- LIANG J S, ZHANG G C, WANG P J, et al. Tectonic evolution of epicontinental basins in South China Sea and their feature of source rocks[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43(5):1309-1319.
- [28] 米立军, 张忠涛, 庞雄, 等. 南海北部陆缘白云凹陷油气富集规律及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5):902-913.
- MI L J, ZHANG Z T, PANG X, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Baiyun Sag at northern continental margin of South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 902-913.
- [29] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征——以南海北部陆缘深水白云凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1):27-39.
- PANG X, REN J Y, ZHENG J Y, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: A case study of Baiyun Sag in the deep-water area of northern South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1):27-39.
- [30] CUI Y C, SHAO L, QIAO P J, et al. Upper Miocene-Pliocene provenance evolution of the central Canyon in northwestern South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40(2):223-235.
- [31] 朱筱敏, 葛家旺, 赵宏超, 等. 陆架边缘三角洲研究进展及实例分析[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5):945-957.
- ZHU X M, GE J W, ZHAO H C, et al. Development of shelf-edge delta researches and typical case analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5):945-957.
- [32] 徐强, 王英民, 王丹, 等. 南海白云凹陷深水渐新世—中新世断阶陆架坡折沉积过程响应[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 906-914.
- XU Q, WANG Y M, WANG D, et al. Sedimentary responses of retreating shelf break from Oligocene to Miocene, in deep water area of Baiyun Depression, South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5):906-914.
- [33] 解习农, 张成, 任建业, 等. 南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12):3280-3291.
- XIE X N, ZHANG C, REN J Y, et al. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12):3280-3291.
- [34] 何家雄, 李福元, 王后金, 等. 南海北部大陆边缘深水盆地成因机制与油气资源效应[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(3):1-11.
- HE J X, LI F Y, WANG H J, et al. Genetic mechanism of deepwater basins and their effects on oil and gas resources on the continental margin of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(3):1-11.
- [35] 庞雄, 朱明, 柳保军, 等. 南海北部珠江口盆地白云凹陷深水重力流沉积机理[J]. *石油学报*, 2014, 35(4):646-653.
- PANG X, ZHU M, LIU B J, et al. The mechanism of gravity flow deposition in Baiyun Sag deepwater area of the northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 646-653.
- [36] WU S G, YUAN S Q, ZHANG G C, et al. Seismic characteristics of a reef carbonate reservoir and implications for hydrocarbon exploration in deepwater of the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6):817-823.
- [37] 吴梦霜, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部深水白垩的发现及其储层意义[J]. *石油学报*, 2013, 34(S2):32-38.
- WU M S, SHAO L, PANG X, et al. Discovery of chalk in deep-water area of the northern South China Sea and its significance of reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S2): 32-38.
- [38] 李友川, 邓运华, 张功成, 等. 南海北部第三系海相烃源岩[J]. *石油学报*, 2011, 32(2):219-225.
- LI Y C, DENG Y H, ZHANG G C, et al. Tertiary marine source rocks in the northern South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2):219-225.
- [39] 郝谄纯, 陈平富, 万晓樵, 等. 南海北部莺歌海—琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化[J]. *现代地质*, 2000, 14(3): 237-245.



- HAO Y C, CHEN P F, WAN X Q, et al. Late Tertiary sequence stratigraphy and sea level changes in Yinggehai-Qiongdongnan Basin[J]. *Geoscience*, 2000, 14(3): 237-245.
- [40] 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J]. *中国海上油气:地质*, 2002, 16(1): 1-11.
- QIN G Q. Division of sequence stratigraphy and sea level changes in the Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 2002, 16(1): 1-11.
- [41] 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等. 南海北部大陆边缘盆地地热特征与油气富集[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 572-585.
- TANG X Y, HU S B, ZHANG G C, et al. Geothermal characteristics and hydrocarbon accumulation of the northern marginal basins, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2): 572-585.
- [42] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 220-229.
- PANG X, CHEN C M, PENG D J, et al. Sequence stratigraphy of Pearl River deep-water fan system in the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 220-229.
- [43] 鲁毅, 崔宇驰, 刘新宇, 等. 中国南海西沙碳酸盐岩台地形成过程及控制因素: 来自西科1井的地球化学证据[J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1197-1208.
- LU Y, CUI Y C, LIU X Y, et al. Formation process and controlling factors of carbonate platform in Xisha area, South China Sea: Based on geochemical evidences from Well Xike-1[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(6): 1197-1208.
- [44] SHAO L, LI Q Y, ZHU W L, et al. Neogene carbonate platform development in the NW South China Sea: Litho-, bio- and chemo-stratigraphic evidence[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 233-243.

## Cenozoic sedimentary evolution and its geological significance for hydrocarbon exploration in the northern South China Sea

GAO Yang-dong, XIANG Xu-hong, ZHANG Xiang-tao  
(CNOOC China Ltd. Shenzhen Co., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** During the Cenozoic, sea-land transition processes have important controlling effect on the depositional and petroleum geological characteristics of the northern South China Sea sedimentary basins. Based on the latest research results of IODP and the existing data in the basin, researches about the formation process of marine sediments in the northern South China Sea are carried out, and its geological significance for hydrocarbon exploration is carried out, in order to provide a basis for the future exploration and development of oil and gas resources. With the seafloor expansion process, the northern South China Sea correspondingly showed a westward and southward marine transgression during the Cenozoic. In Eocene, marine transgression firstly occurred in the Taixinan Basin in the eastern South China Sea. Later it was not until Late Oligocene that marine transgression occurred in the Yinggehai Basin of the western South China Sea. IODP 367/368 site revealed that the initial marine transgression occurred at ca. 34 Ma, and coincided with the start of the South China sea seafloor spreading. The southwest sub-basin of the South China Sea was originally formed at ca. 23 Ma, and large-scale transgression with drastic sedimentary environment changes took place during this time. Marine source rock strata in the northern South China Sea basins gradually get younger from east to west, which is also consistent with the westward marine transgression processes. Under the comprehensive impacts of both South China Sea expansion and global sea level changes, carbonate platforms also evolved from east to west, and from south to north, and formed a self-generation and self-storage oil and gas reservoir pattern in the northern South China Sea. Conclusively, sea-land transition has controlled sedimentary infilling processes within different basins, which were formed as material foundation for petroleum resources. Horizontally, the northern South China Sea source-reservoir-cap assemblage was dominated by provenances and sedimentary environment evolution. Vertically, on the other hand, it was mainly controlled by regional tectonic events and sea level changes.

**Key words:** South China Sea; Sea-land transition; Marine strata; Sea level changes; Petroleum resources